

Perspectivas para a eletrônica orgânica no Brasil

Ricardo Rivera
Ingrid Teixeira

Perspectivas para a eletrônica orgânica no Brasil

Ricardo Rivera

Ingrid Teixeira*

Resumo

Uma nova eletrônica se descortina com o surgimento de novos materiais orgânicos semicondutores, a eletrônica orgânica (EO). Para fins de comparação, a EO está atualmente no estágio de desenvolvimento tecnológico equivalente ao que a eletrônica tradicional baseada no silício estava há quarenta anos. Entretanto, a EO já é realidade: os *displays* Organic Light-Emitting Diode (OLED, Diodo Emissor de Luz Orgânico) embarcados em *smartphones premium* representam a primeira aplicação em massa dessa nova tecnologia. Estados Unidos da América (EUA), Europa, Japão, Coreia e China já posicionaram seus institutos de pesquisa, empresas e governos para aproveitarem o novo mercado a ser formado pelos dispositivos flexíveis, transparentes, finos, biodegradáveis e com possibilidade de serem produzidos a baixo custo, com uso de técnicas de impressão. O presente artigo mostra os esforços e investimentos feitos pelo Brasil, bem como apresenta oportunidades para o país alcançar posição de destaque nesse segmento da eletrônica no futuro.

* Respectivamente, gerente setorial e engenheira do Departamento de Tecnologia da Informação e Comunicação da Área Industrial do BNDES. Os autores agradecem ao professor Roberto Faria, do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo (IFSC/USP), e ao professor Marco Cremona, do Instituto de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (IF/PUC-Rio), a receptividade durante as visitas, discussões e contribuições sobre o tema e aos revisores anônimos do texto.

Introdução

As tecnologias emergentes, por vezes, substituem outras correntes em um curto espaço de tempo, por exemplo, a adoção do *smartphone*. Empresas então líderes ou bem posicionadas rapidamente perderam mercado, e setores como a produção fonográfica e de computadores pessoais foram afetados de maneira assertiva em um intervalo de tempo inferior a meia década. Há, todavia, aquelas tecnologias que, apesar de disruptivas, demoram a maturar. Além de se tornarem econômicas do ponto de vista produtivo, necessitam enfrentar a reação das concorrentes já estabelecidas, que reduzem custos, elevam barreiras de entrada e melhoram sua *performance*. O veículo elétrico é um exemplo de tecnologia que precisa vencer um longo percurso para chegar a deslocar suas pares já estabelecidas.

O presente artigo tem como tema central a EO, com especial interesse nos métodos de produção contínuos proporcionados pela eletrônica impressa (EI). A EO iniciou seu desenvolvimento na década de 1970 e hoje ainda possui um largo campo de possibilidades e interrogações, mas já tem sua primeira aplicação de mercado de escala: os *displays* OLED. No lugar do silício, a EO utiliza-se de insumos químicos (polímeros ou moléculas) que combinam as propriedades de condutividade elétrica dos semicondutores tradicionais com as virtudes do plástico e outros substratos flexíveis, moldáveis e transparentes, criando novos mercados – como em biossensores, absorvíveis pelo corpo humano; painéis solares orgânicos, que, por não esquentarem, serem leves e translúcidos, podem ser dispostos em uma represa de uma hidroelétrica sem afetar a vida aquática local; ou painéis de iluminação leves, flexíveis e de diversas geometrias, que podem ser usados em ambientes internos de aeronaves ou automóveis.

Contudo, talvez a característica mais importante da EO seja o potencial de produção de componentes e produtos em processo de produção contínua, revolucionando a escala e, por conseguinte, tendo o potencial de reduzir custos de investimento de produção de semicondutores da casa dos bilhões para centenas ou dezenas de milhões de dólares. Trata-se da EI que, embora venha sendo usada há muitos anos em componentes inorgânicos,¹ avanços nas técnicas de impressão deverão permitir uma ampliação significativa de suas aplicações, com possibilidade de customizar ou produzir em massa pro-

¹ Por exemplo, impressão de condutores nas janelas dos carros para evitar o embaçamento dos vidros.

duto que vão dos citados *displays* OLED a circuitos e sistemas integrados, roupas, papéis etc. e células solares.

O mercado estimado pela consultoria IDTEchEx para a EI, ou eletrônica potencialmente impressa, quer envolva os orgânicos, quer os inorgânicos, quer os compostos, é de algumas centenas de bilhões de dólares em 2025. Quando comparados com os do universo da eletrônica baseada em silício, os números são relativamente tímidos. Mas os benefícios que essa tecnologia oferece – como baixo custo, robustez pela flexibilidade, leveza, possibilidade de impressão em grandes áreas,² transparência, possibilidade de integração de diversos componentes eletrônicos em objetos inteligentes, benefícios ambientais e menor consumo de energia – a posicionam como uma das plataformas mais promissoras na eletrônica, com potencial de tornar-se ubíqua em futuro não tão longínquo.

Não por menos, na Europa já existe mais de quatrocentas instituições e empresas formando cerca de 17 *clusters* em 13 países e há intenso incentivo dos governos, que enxergam na EO e na EI uma possibilidade de reativar suas economias e empregos [OE-A (2013)]. EUA, Japão e Coreia também realizam investimentos de monta significativa.

Desde 2008, o BNDES vem tratando a EO como uma área promissora tecnologicamente, dedicando a ela a qualidade de foco na utilização do BNDES Fundo de Desenvolvimento Tecnológico (Funtec). Trata-se de uma das mais nobres fontes de recursos do Banco, composta por parte dos lucros da instituição, destinada a focos setoriais muito específicos que possam alavancar o desenvolvimento tecnológico brasileiro. Desde então, cerca de R\$ 80 milhões foram enquadrados para estruturação de operações de financiamento do BNDES na área de EO.

Com a crescente utilização dos recursos não reembolsáveis do Banco, os autores julgaram pertinente dar luz ao tema (EO) e destacar a EI como ponto de atenção para as políticas tecnológicas na área, com ênfase especial em dois campos aparentemente promissores para a entrada do país em nível competitivo globalmente para o desenvolvimento e produção de células fotovoltaicas e dispositivos de iluminação. Ambas as aplicações preveem a produção em tecnologias de impressão no futuro, apresentando potencial

² Na Europa, usa-se o termo Organic and Large Area Electronics (OLAE) em referência à eletrônica orgânica, impressa e flexível.

de composição de novas cadeias globais de produção e, por conseguinte, abrindo oportunidade para o país.

Além de realizar revisão bibliográfica e estudos prospectivos de consultorias especializadas, os autores visitaram projetos em andamento, participaram de conferência mundial e entrevistaram especialistas da área e formuladores de políticas públicas. O artigo se divide na presente introdução, seguida por uma seção de conceitos básicos sobre EO e EI e, na sequência, apresenta os elos gerais da cadeia de valor. Na quarta seção, os principais mercados para EO são analisados, ao passo que a quinta concentra-se nos modelos de apoio governamentais, nas propostas de políticas e modelos para o Brasil. A última seção traz as conclusões.

Conceitos básicos

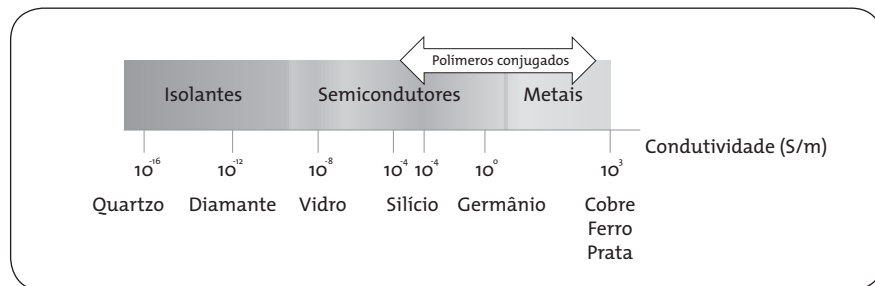
Semicondutores orgânicos

Os semicondutores são materiais que possuem um valor de condutividade elétrica intermediário entre os materiais isolantes (como o vidro) e os condutores (como o cobre). Isso se deve, em linhas resumidas, a características desses materiais quanto ao distanciamento entre as camadas de valência e de condução, que permitem o controle pelo projetista de suas propriedades elétricas. São, portanto, muito utilizados na fabricação de componentes eletrônicos, elétricos, ópticos e optoeletrônicos. Os semicondutores historicamente mais conhecidos são os inorgânicos, dentre os quais, destacam-se o silício, o germânio e o arsieneto de gálio (GaAs).

Até o início dos anos 1970, os polímeros eram situados na faixa dos materiais isolantes, com baixíssima condutividade elétrica. Em 1969, o doutor Kawai demonstrou ser possível gerar eletricidade por meio de um polímero sintético. Essa descoberta levantou interesse de pesquisa sobre a possibilidade de que outros polímeros também tivessem características elétricas. O professor Shirakawa, estudando a polimerização do acetileno, observou a formação de um filme brilhante na superfície da solução em análise. Esse filme ainda não era condutor elétrico. A partir de 1975, Shirakawa uniu-se a Alan Heeger e Alan MacDiarmid (EUA) e, conjuntamente, em suas investigações sobre os polímeros, alcançaram em 1977 a produção de polímeros condutores, descoberta com enorme impacto na comunidade científica mundial, atribuindo-lhes o Prêmio Nobel de Química em 2000. Em 1987,

foi apresentado por C. Tang e S. VanSlyke, da Eastman Kodak, o primeiro dispositivo emissor de luz eficiente baseado nesses materiais, que ficou conhecido por OLED. Desde então, a ciência dos polímeros conjugados condutores (Figura 1) tem avançado rapidamente, na chamada EO.

Figura 1 | Condutividade dos polímeros comparada com a de outros materiais



Fonte: BNDES, adaptado de NobelPrize (2000).

Principais rotas da EO

Para fins didáticos, a EO pode ser dividida em duas grandes rotas, com propósitos diferentes: a miniaturização e a eletrônica de grandes áreas.

Para fins de comparação entre os dois domínios, tome-se o referencial dado pela Lei de Moore,³ na qual se estabeleceu que, a cada 18 ou 24 meses, seria possível integrar na mesma área o dobro de transistores. Caminhando-se no sentido da *miniaturização*, na busca de mais funcionalidades, tem-se o subdomínio do More Moore. A inovação é feita a fim de atender a requisitos de processamento, capacidade de armazenamento e comunicação intensos em escalas reduzidas e de baixo consumo de energia. O objetivo é, portanto, o de auxiliar a rota tecnológica estabelecida a superar seus desafios, usando-se outros materiais, como o grafeno.

Pode-se ir além da miniaturização dos transistores, o que se denomina *beyond CMOS*⁴ ou *beyond Si* (Silício), com o emprego de nanotecnologia para se conseguir aumento de desempenho, em que, no limite, um átomo

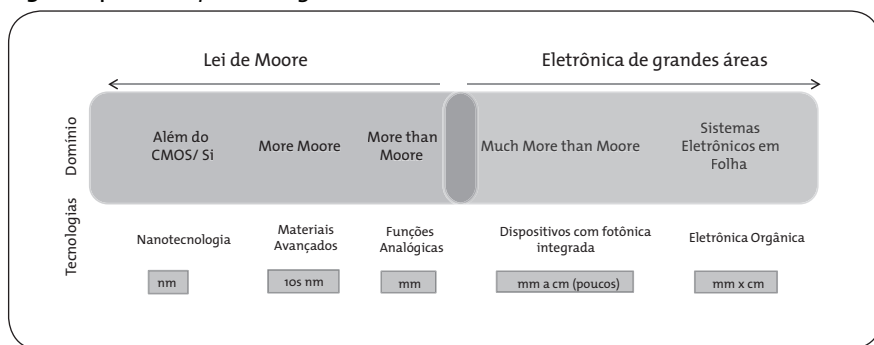
³ Gordon E. Moore, cofundador da Intel Co., quem apresentou, em 1965, a tendência de que o número de transistores iria dobrar a cada 18 ou 24 meses.

⁴ Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) é uma tecnologia empregada na indústria de semicondutores convencional para construir os transistores e os circuitos integrados.

(eletrônica convencional) ou uma molécula poderia representar a menor unidade de processamento nos circuitos.

No subdomínio *More than Moore*, há a introdução de funcionalidades não digitais, que não necessariamente escalam de acordo com a Lei de Moore. Exemplos incluem conversão de informação não digital como mecânica, térmica, acústica, química, óptica em dados digitais, como os dispositivos que agregam *micro mechanical devices* (MEMS), microfluídica e funcionalidades biológicas (sensores).

Figura 2 | Roadmap tecnológico em eletrônica



Fonte: BNDES, adaptado de OE-A (2013).

Caminhando para a rota da eletrônica de maiores dimensões, passa-se pelo subdomínio dos sistemas inteligentes miniaturizados, com o uso de dispositivos heterogêneos integrados, no campo da fotônica, sistemas Micro Nano Bio Systems (MNBS), no que se denomina *Much More than Moore*. Seguindo para dispositivos de maiores dimensões, denominados por alguns países e autores de *Organic and Large Area Electronics* (OLAE, **Eletrônica Orgânica de Grandes Áreas**), a inovação ocorre para atender primordialmente a novas aplicações com flexibilidade, transparência, biocompatibilidade e portabilidade, sendo a miniaturização e o desempenho objetivos secundários.

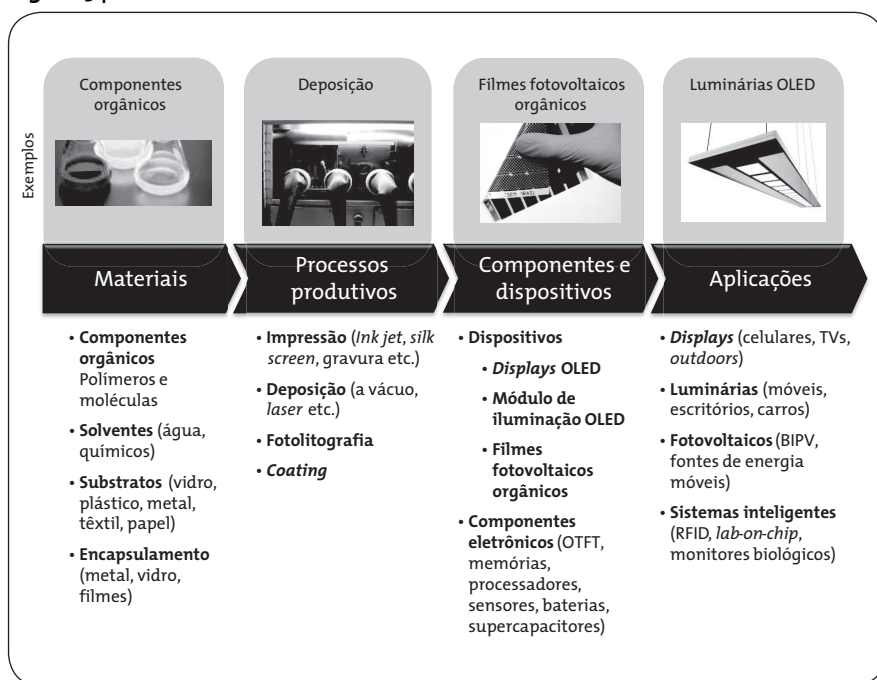
Baseado em materiais semicondutores orgânicos ou híbridos (com elementos orgânicos e inorgânicos), esse ramo da EO aplica-se diretamente ao domínio dos sistemas inteligentes miniaturizados (Figura 2), pois abre possibilidade de aplicações que requerem maiores áreas e/ou flexibilidade, como o papel ou o plástico. Utilizam-se, para tanto, materiais menos tóxi-

cos, disponíveis e baratos comparando-se com a eletrônica tradicional. A tecnologia envolvida é a de manufatura escalável, geralmente com métodos aditivos (como impressão) em substratos flexíveis (como papel, filmes plásticos ou folhas de metálicas).

Cadeia de valor

A cadeia de valor da indústria de semicondutores orgânicos pode ser organizada conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 | Cadeia de Valor da EO



Fonte: BNDES, adaptado de OE-A (2013). Imagens © CSEM Brasil, © CSEM Suíça e © CERTI.

Embora há mais de vinte anos Europa, EUA, Japão e Leste Asiático invistam no desenvolvimento tecnológico e industrial para dominar a cadeia de valor, ainda há muito o que se desenvolver quanto a processos, novos materiais e aplicações. Por conseguinte, existe uma forte necessidade de integração e colaboração nessa cadeia, pois uma inovação em um dos elos pode afetar o direcionamento de todos os outros.

Materiais e processo de produção

As formas como os componentes são criados dependem intimamente do processo de produção e dos materiais utilizados. Apesar de aparentar trivial, essa afirmação é crítica para EO, pois todos os elos da cadeia estão em desenvolvimento e afetam-se mutuamente. Em outras palavras, da escolha de um determinado tipo de molécula – por exemplo, polímero – para um dado processo de produção – por exemplo, impressão *inkjet* –, resultará o grau de eficiência e a durabilidade do dispositivo – por exemplo, 3% de eficiência de conversão energética durante cinco anos para painéis de Organic Photovoltaics Modules (OPV) –, que poderão ser influenciados pelo meio onde esse dispositivo será instalado – por exemplo, janelas de edifícios.

A ciência dos **materiais** avançados é peça fundamental nessa nova eletrônica, seja ela orgânica, seja de novos elementos inorgânicos, e nela reside a maior parte da propriedade intelectual (PI) gerada na área. Empresas como DuPont, UDC, NovaLed, Plextronics e Merck possuem milhares de patentes – somente esta última possui mais de 2.500 patentes em EO.

Os materiais são divididos em condutores, semicondutores e dielétricos (isolantes). A Figura 4 mostra um esquema genérico de um transistor e um diodo, ressaltando os diferentes materiais usados em sua construção.

Figura 4 | Esquemas genéricos

Figura 4A | Diodo

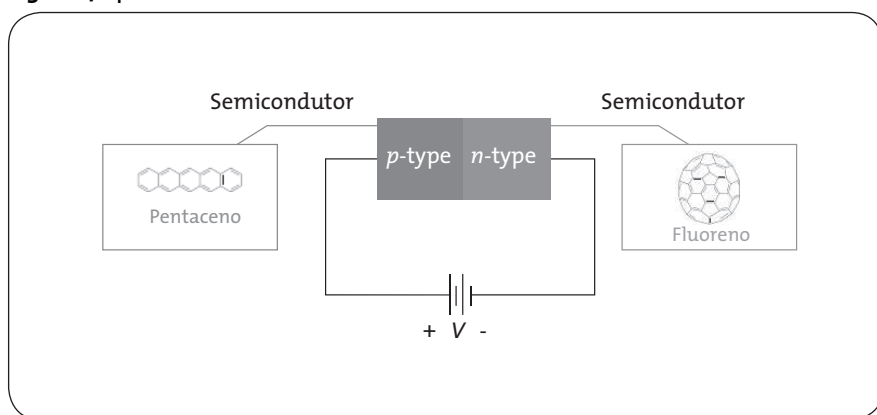


Figura 4B | OLED

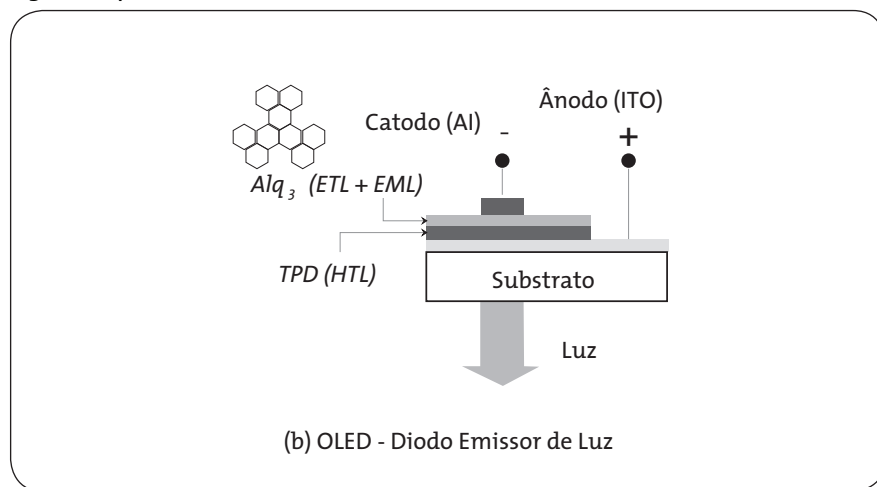
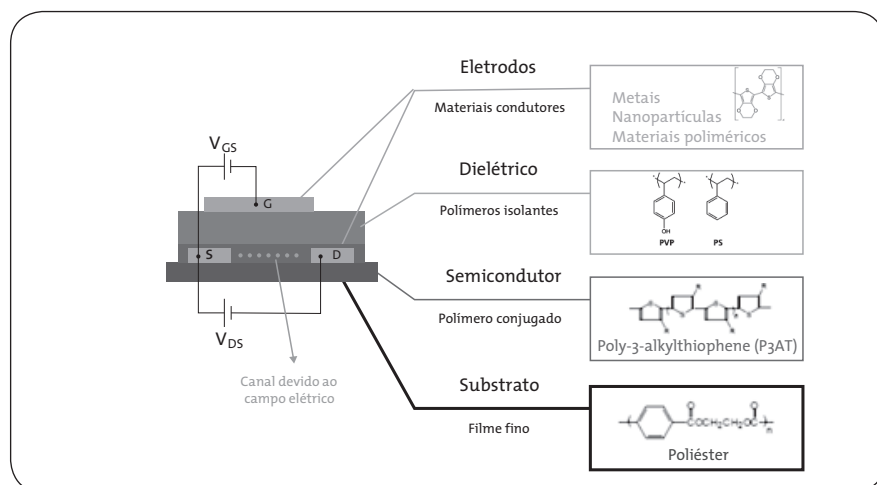


Figura 4C | Transistor



Fonte: BNDES, adaptado de Cremona (2006).

Os materiais **condutores** podem ser compostos orgânicos – por exemplo, o PEDOT:PSS (polímeros), que possui alta condutibilidade, boa transmissão óptica no espectro visível e alta estabilidade – e inorgânicos (metais e

óxidos de metais).⁵ Uma grande variedade de materiais pode ser utilizada como **dielétricos**. Polímeros orgânicos como polipropileno, poli vinil fenol, poli metil metacrilato, entre outros, podem ser usados como dielétricos e são comercialmente disponíveis com um baixo custo de produção.

Normalmente, os componentes e dispositivos orgânicos utilizam uma ou mais camadas **semicondutoras** orgânicas. Os semicondutores são a classe de materiais cujas propriedades são mais difíceis de controlar e os mais complicados para se depositar, sendo a pureza dos materiais e sua reprodutibilidade de importância fundamental para o sucesso do dispositivo final. Os materiais que compõem essa classe podem ser as pequenas moléculas e os polímeros (grandes moléculas).

O sucesso do dispositivo orgânico depende também das características do **substrato** onde ele é fabricado. Os substratos mais utilizados são o vidro (em que se busca superfície extremamente plana, transparente, com baixa rugosidade, baixo conteúdo de impurezas), e os tipo poliméricos (flexibilidade, estabilidade temporal, ou seja, minimizar os efeitos de temperatura e umidade na variação dos compostos orgânicos). Dependendo da técnica de deposição do material, devem-se observar também a resistência a altas temperaturas e a interação com os demais materiais durante o processo produtivo.

Além do tipo de material e do substrato utilizado, o **encapsulamento** tem um papel essencial na construção dos dispositivos, pois evita a deterioração das camadas, causada principalmente pela água e pelo ar em contato com o material ativo orgânico. A camada de encapsulamento pode ser formada por vidro cavado, desumidificador e camada adesiva. Encapsulamento com vidro rígido normalmente leva a maior tempo de vida, superior a dez anos, mas obviamente compromete a flexibilidade da aplicação. O uso de polímeros como substrato pode permitir a flexibilidade, mas traz desafios para a construção (podem se movimentar durante o processo de produção) e de durabilidade mais limitada.

Os **processos de produção** (deposição dos materiais) podem ser por:

- **Deposição por vapor:** usada com pequenas moléculas, o material é depositado por meio de vaporização física das moléculas no

⁵ Ressalta-se que na construção de dispositivos tidos como da área da EO, como os *displays* OLED, há em geral a presença de compostos inorgânicos, como o óxido de índio com estanho – ITO (um óxido de metal), utilizado na camada de touch panel por apresentar alto índice de transparência e boa estabilidade térmica e química.

substrato em câmaras a vácuo. Esse processo é mais difundido na produção de *displays* e iluminação OLED – dominado pelos Small Molecules OLEDs (SMOLEDs) –, pois confere maior eficiência (todas as cores disponíveis com alta luminância e tempos de vida adequados das três cores básicas) e há ampla disponibilidade de fornecedores de matérias-primas em função da menor complexidade de produção se comparada com a dos polímeros, que possuem poucos fornecedores, como a japonesa Sumitomo e a Merck. A principal crítica à atual tecnologia SMOLED é a baixa eficiência do processo em razão do alto desperdício de material.⁶

- **Solução-processada (impressão):** a camada semicondutora orgânica é depositada por processamento de solução no substrato, via técnicas de impressão. Apesar de disponível para pequenas moléculas, esse processo surgiu com os polímeros, que apresentam como grande vantagem a maior flexibilidade para adicionar funcionalidades sem alterar os atributos existentes, por exemplo, incorporar uma nova molécula que absorve luminosidade em uma faixa do espectro não absorvida pelas outras do polímero original.

A impressão pode utilizar o formato folha a folha (*sheet-to-sheet* ou S2S) ou rolo a rolo (*roll-to-roll* ou R2R), e este último tende a ser mais econômico para grandes volumes, embora de maior complexidade no controle do processo de produção. Dado o potencial de redução de custos pela escala e a versatilidade de tamanhos e características que podem ser produzidos por meio de impressão R2R, as células Organic Photovoltaic (OPV), baterias, sensores e outros diversos dispositivos estão tendo esse tipo de impressão como principal rota de desenvolvimento. Inclusive os *displays* podem no longo prazo convergir para técnicas de impressão [IDTEchEx (2013); Melnick (2012)].

As diferentes formas de impressão para EO em geral derivam de técnicas existentes para a produção de bens não eletrônicos e são apresentadas no Quadro 1. A EI tende a se apropriar de alguma(s) dessas técnicas atuais e desenvolver os ajustes para construção de dispositivos eletrônicos.

⁶ Muito embora o grau de aproveitamento utilizando a técnica de Organic Vapor Physical Deposition (OVPD), da empresa alemã Aixtron AG, venha sendo aprimorado ao longo do tempo.

Quadro 1 | Técnicas de impressão em EI

Técnicas de impressão	Exemplos	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Impressão de grandes áreas	<i>Silkscreen</i>	A tinta passa por uma tela onde o desenho está feito, os buracos na trama permitem a passagem da tinta.	Permite uma grande faixa de viscosidade das tintas. Relativa facilidade em grandes formatos. Flexibilidade e facilidade de uso. Escalabilidade provada industrialmente.	Não é aplicável a filmes finos. Resolução atual 35 µm, taxa de produção e interações em impressões multicamadas.
Impressão de grandes áreas	Gravura	Utilizado em embalagens, publicações, laminados.	Muito rápido, relativamente simples, imagens com mais qualidade. Resolução 25 µm-30 µm.	Quantidade de tintas, custo de capital, tinta com baixa viscosidade, sem rota clara de escalonamento produtivo.
Impressão de grandes áreas	Flexografia	Aplicações gráficas para embalagens e publicidade.	Independência da espessura do filme e da imagem, resolução melhorada (30 µm), alta velocidade (500 m/min), impressão suave.	Limitação da espessura do filme (2 µm-10 µm), durabilidade/ deformação dos rolos devido aos solventes usados. Sem rota clara de escalonamento produtivo.
Impressão digital (impressão sem impacto)	<i>Inkjet</i>	É um processo bastante difundido em uso. Permite um controle digital da impressão e customização a cada uso.	Rota clara de escalonamento produtivo, grande base de conhecimento científico, sem contato, controle digital, menor volume de líquido, resolução 50 µm.	Deposição das gotículas, filmes finos, taxa de produção, limitação de partículas.
Estamparia/ relevo	Estamparia a quente folha	Transfere por calor e pressão para o substrato a tinta fluida.	Alta velocidade, independência da espessura do filme e da imagem.	Limitação do uso de substratos devido à alta temperatura.

(Continua)

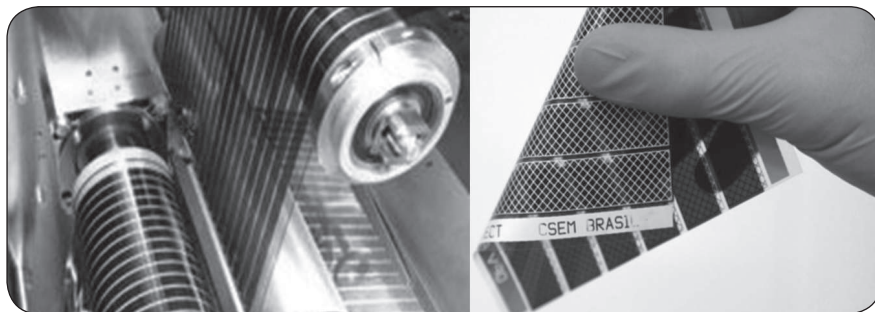
(Continuação)

Técnicas de impressão	Exemplos	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Outros	Nanolitografia	É o processo mais popular usado nas gráficas. Livros, revistas, embalagens etc.	Filmes finos, resolução e qualidade, experiência.	Apenas em filmes finos, complexidade para fabricação da máquina, controle e <i>setup</i> , limitada a reologia “grossa”, sem rota clara de escalonamento produtivo.

Fonte: BNDES, adaptado de Dörsam (2013).

O **processo de impressão** pode ser subdividido, de maneira geral, nos seguintes passos: escolha da tinta, pré-dosagem e dosagem da tinta, transferência da tinta para o substrato, dinâmica do fluido no substrato e solidificação [Dörsam (2013)]. A combinação da técnica de impressão, formato (rolo ou folha) e as tintas determinam a capacidade e qualidade da imagem de cada tecnologia. Por exemplo, a técnica de *silkscreen* é limitada pelo tamanho da trama utilizada para a produção de imagens que não possuem a melhor definição permitida, por exemplo, pela técnica de nanolitografia. Esta, por outro lado, não permite o uso de maior variedade de tintas de baixa viscosidade que o *silkscreen*. *Inkjet* pode ser compatível com uma grande variedade de substratos e permite que cada peça seja única, diferentemente do *silkscreen* e da nanolitografia. Entretanto, a técnica de *inkjet* é de certa forma limitada pela viscosidade dos fluidos, tempo de secagem e reprodutibilidade da impressão.

Figura 5 | Processo de produção em rolo de células OPV usando flexografia



Fonte: © CSEM Brasil.

Existe claramente uma curva de aprendizado para cientistas e engenheiros com propósito de definir a estratégia para a impressão de múltiplas camadas e interconexões e conseguir um meio confiável para integrar silício e EI de forma barata e em alto volume. Atualmente, há baixo controle e entendimento das técnicas, ainda consideradas artesanais, havendo necessidade, portanto, de se ter um processo efetivamente mais estável e reprodutível de produção.

Componentes eletrônicos e dispositivos

Seguindo passo adiante na cadeia de valor, os **componentes eletrônicos e dispositivos** são elementos-chave, em princípio não comercializáveis isoladamente, que irão *compor* as diversas aplicações. O domínio tecnológico e produtivo desses elementos pode ser visto como o primeiro resultado tangível em direção às aplicações. Os **componentes eletrônicos** mais elementares a semicondutores são basicamente dois: os diodos e os transistores.

Os **diodos** são estruturas mais simples, contendo dois eletrodos que realizam o processo de injeção de portadores de cargas: o ânodo, responsável por receber os elétrons quando aplicada uma tensão entre os dois eletrodos, e o cátodo, que irá emití-los. Entre os dois eletrodos, há uma camada ativa semicondutora orgânica,⁷ podendo haver camadas auxiliares, que realiza o transporte elétrico. Os **dispositivos** criados com diodos que mais se destacam na EO são os diodos emissores de luz orgânicos (**OLED**) e os diodos fotovoltaicos orgânicos (**OPV**).⁸ Tanto os OLEDs quanto os dispositivos OPV são dispositivos de multicamadas, nos quais, além da camada ativa que irá determinar sua funcionalidade, são depositadas camadas intermediárias que auxiliam sua operação. Pela simplicidade da estrutura, esses dispositivos tendem a ser desenvolvidos com maior facilidade por meio de processo de impressão, o que, como já dito, representa um potencial de redução significativo de custos e aplicações imediatas.

Os **transistores** são os elementos principais dos sensores e circuitos integrados que, além da função de transporte de cargas, operam principalmente como amplificadores e interruptores de sinais elétricos. Dentre os transistores, destacam-se os transistores orgânicos de filmes finos

⁷ Essas duas camadas, conhecidas também por junção p-n, possibilitam a injeção de portadores e o transporte elétrico, ao estarem submetidas a uma tensão elétrica.

⁸ No OLED, na camada ativa, as cargas emitidas pelos eletrodos se recombinam, emitindo luz. No OPV, ocorre o processo inverso, na camada ativa, há absorção de energia da luz solar e há dissociação de cargas capturadas pelos eletrodos.

por efeito de campo – Organic Thin Film Transistor/Organic Field Effect Transistors (OTFT/OFETs). Sua estrutura é um pouco mais complexa do que a do diodo, por conter três eletrodos: fonte, dreno e porta, sendo esta última a que controla a passagem e a intensidade da carga entre fonte e dreno. Os **dispositivos** criados com os transistores podem ser, por exemplo, papel eletrônico, memórias, circuitos integrados e sensores.

Atualmente, os transistores orgânicos de filmes finos, OTFT, são ainda de baixo desempenho em mobilidade elétrica quando comparados com os construídos por semicondutores inorgânicos (cerca de 1% destes).⁹ Pode-se dizer que em EO a tecnologia para processadores, por exemplo, compara-se ao nível que estava a eletrônica tradicional de semicondutores décadas atrás.

Em 2011, quarenta anos após o primeiro microprocessador de silício ser produzido, Intel 4004, Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) e o centro de pesquisa Holst (holandeses) apresentaram o primeiro processador plástico totalmente produzido a temperaturas abaixo de 250°C [Lombaers (2013)]. Esse dispositivo revolucionário foi considerado o “microprocessador mais lento do mundo”, pois tinha frequência de operação de até 40 Hz. Entretanto, em 2013, foi apresentado um novo microcontrolador de propósito geral de oito bits, que opera até 2,1 kHz, mais avançado, porém ainda 1 milhão de vezes mais lento que os processadores dos computadores pessoais, que operam na ordem de GHz. Naturalmente, os primeiros nichos de mercado são os que não requerem elevado processamento, mas que não podem utilizar os semicondutores tradicionais, seja, por exemplo, pela inflexibilidade, seja pela biocompatibilidade, seja por questões ambientais. Todavia, pode-se pensar que a EO irá evoluir segundo uma nova Lei de Moore, que está em desenvolvimento.

Existe uma diversidade de áreas de conhecimento e tecnologias envolvidas, e não é possível afirmar que exista uma solução única de material-deposição-substrato-encapsulamento para todas as aplicações. Trata-se de um momento da evolução da EO caracterizado por um intenso processo de investigação e experimentação. Como se trata de uma tecnologia não madura, espera-se que um conjunto de tecnologias conviva, cada uma ocupando um determinado nicho de mercado, até que o surgimento de um novo material, processo ou tecnologia modifique o quadro vigente.

⁹ Fonte: <<http://www.hpl.hp.com/techreports/2012/HPL-2012-66.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

Aplicações

Segundo Associação de Eletrônica Orgânica e Impressa da União Europeia (OE-A) (2013), o *roadmap* de mercado para as aplicações baseadas em EO prevê uma crescente complexidade em cada um dos cinco grupos de aplicações: (i) fotovoltaico orgânico, (ii) *displays* OLED, (iii) Iluminação OLED, (iv) eletrônicos e componentes (ex.: baterias, transistores, circuitos) e (v) sistemas inteligentes integrados (ex.: RFID e novos substratos, como tecido), conforme a Quadro 2.

Essas aplicações têm o potencial de estabelecer novos produtos, que poderão deslocar tecnologias já maduras ou criar novos mercados, baseados em atributos como menor consumo de energia, leveza, flexibilidade e custo de produção. Diversas publicações têm avaliado que **o mercado da EO será formado em grande parte por novas aplicações**, abrindo uma janela de oportunidade para países e empresas entrantes em um setor de alta tecnologia.

Quadro 2 | Roadmap para as aplicações em EO

Aplicações	Existentes (2013)	Em desenvolvimento (2014-2020)	Planejados (2021+)
Fotovoltaico orgânico	Carregadores Portáticos	Eletrônicos de consumo, fontes móveis de energia, integração predial para consumo	Integração predial conectada à rede
<i>Displays</i> OLED	<i>Displays</i> em pequenas aplicações	<i>Displays</i> OLED dobráveis, LCD plástico, outdoors, <i>displays</i> OLED enroláveis e (semi)transparentes	TVs OLED enroláveis e telemedicina
Iluminação OLED	Projetos <i>design</i>	Baterias recarregáveis de célula única, <i>displays</i> impressos, baterias multicélulas impressas, <i>chip</i> impresso flexível	Iluminação em geral
Eletrônicos e componentes	Baterias de célula única, pequenas memórias	Módulos de iluminação decorativos, módulos flexíveis de iluminação	Baterias impressas, etiquetas inteligentes
Sistemas Integrados Inteligentes	Roupas com sensores antifurto, sensores	Rede de sensores, empacotamento inteligente, sensores sobre tecidos, pequenos <i>displays</i> , RFID impresso	OLED sobre tecidos, BIPV

Fonte: BNDES, adaptado de OE-A (2013).

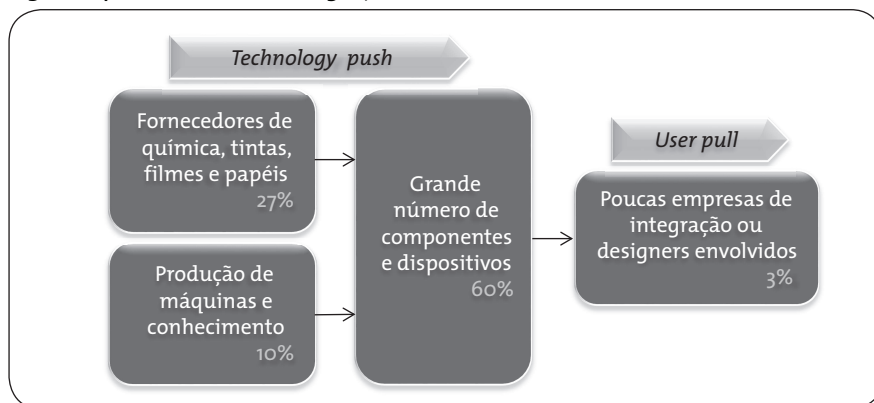
Desafios da EO

Visão integrada na cadeia de valor orientada a mercado

A EO é composta pela ciência e tecnologia dos materiais, sendo uma tecnologia transversal nas áreas de conhecimento da física, química, engenharia eletrônica e outras engenharias para definição de processos, qualidade, deposição dos materiais etc. Há desafios em toda a cadeia produtiva, que, todavia, encontra-se em formação, desde a produção dos materiais orgânicos, passando pelos produtores de máquinas e equipamentos até o produto final, sendo necessário um olhar integrado sobre toda a cadeia de valor [IDTEchEx (2013)].

Atualmente, a maior concentração de empresas (60%) está na produção dos componentes e dos dispositivos – *displays* OLED, iluminação OLED, filmes fotovoltaicos orgânicos, transistores, baterias etc. – *vide* Figura 6. Outro grupo expressivo, 27%, concentra os fornecedores de química, tintas, papéis. Dessa forma, percebe-se que há um maior esforço das empresas em empurrar a tecnologia – *technology push* – em oposição a empresas de integração e *design* dos produtos, com 3% de empresas pensando nas necessidades dos usuários – *user pull*. Por isso, o estudo IDTEchEx observa que a tendência, pelo menos enquanto a massificação tecnológica da EO não ocorrer, é de que as empresas estejam envolvidas não somente com o produto, mas também com os dispositivos, materiais e processo de produção.

Figura 6 | Necessidade de integração da cadeia de valor da EO



Fonte: BNDES, adaptado de IDTEchEx (2013).

Design de produtos

Flexibilidade, novas geometrias e leveza dos produtos feitos com EO permitirão o desenvolvimento de novos mercados. Por exemplo, com a EO, uma única aplicação construída por sucessivas camadas com células solares em OPV, bateria impressa e iluminação OLED totalmente integradas, ou em grandes células de energia solar portáteis e flexíveis (em formato de rolo) para serem transportadas, por exemplo, de helicópteros para lugares remotos ou em situação de calamidade pública. As possibilidades de novas luminárias OLED construídas com filmes finos permitem fontes de luz difusas aplicadas a diversos ambientes não planos, como forro do teto de aeronaves e automóveis. Essa aplicação também não teria viabilidade com o uso do silício em virtude principalmente da rigidez, do peso e do custo de produção de grandes áreas.

Materiais

Como as rotas tecnológicas inorgânicas seguem em evolução, o avanço nos materiais orgânicos é chave para que a EO se consolide nos diferentes segmentos de mercado. Entre outros desafios, os materiais orgânicos precisam de melhorias de desempenho elétrico, processamento, escala (custos), estabilidade e compatibilidade com os solventes (para EI) para atender a aplicações mais complexas.

Figura 7 | Fluxo elétrico formado nos polímeros condutores e no silício

Figura 7A | Fluxo elétrico no polímero (ex.: OPV)

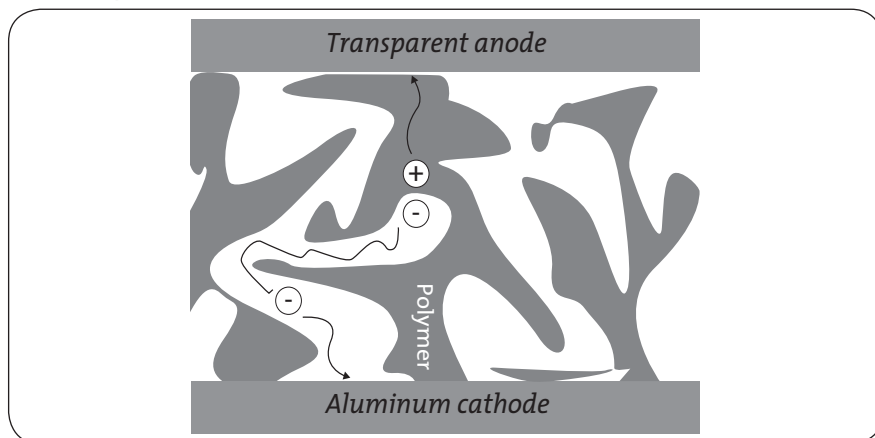
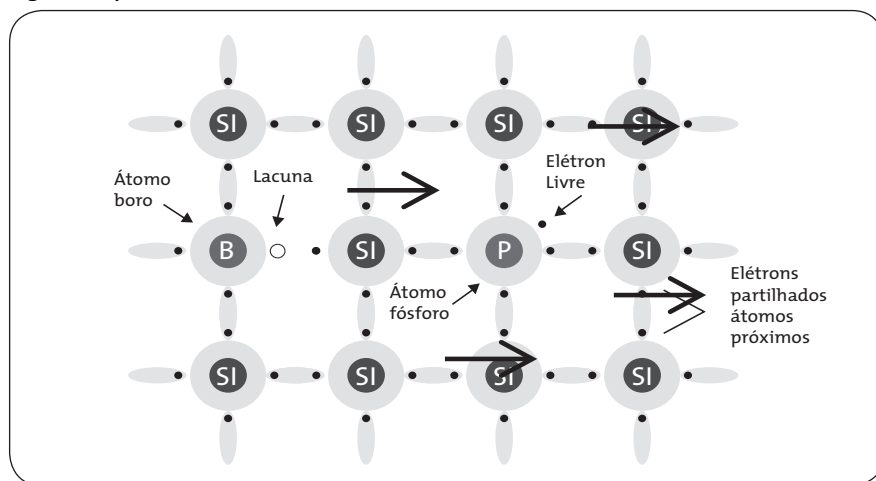


Figura 7B | Fluxo elétrico no silício



Fonte: Adaptado © CSEM Suíça.

Se por um lado, a morfologia dos polímeros permite produzir uma grande variedade de estruturas com relativa facilidade, por outro, condiciona o fluxo dos elétrons, mais complexo (Figura 7A) se comparado com a estrutura cristalina e ordenada do silício (Figura 7B). Por isso, alcançar o nível de *reprodutibilidade no processo* para construir circuitos minimamente complexos ainda é desafiador.¹⁰

Processos

Dada a característica morfológica dos materiais orgânicos, o desafio da reprodutibilidade no processo de produção na EO (e especialmente na EI) é sensivelmente superior ao da indústria tradicional de semicondutores, que utiliza materiais inorgânicos muito estáveis, com processo de deposição a vácuo extremamente preciso, em que as propriedades mecânicas e elétricas são controladas a nível atômico.

Outra restrição que aparece na EO com relação aos processos produtivos é a necessidade de se atender a requisitos de velocidade, temperatura, solventes, condições de ambiente, vácuo, entre outros fatores, para cada aplicação. Por exemplo, o uso de substratos plásticos tipo PET possui requisitos tais que impedem o uso de métodos de produção que envolvem altas temperaturas, como o *laser printing*.

¹⁰ Entrevista com o pesquisador Alberto Salleo, Universidade de Stanford, EUA, concedida ao Boletim da SBPMat.

A redução da dimensão (*pitch*) conseguida pela técnica de impressão está atualmente em 0,5 μm e parece insuficiente para algumas aplicações, como os *displays* OLED, precisando ainda transpor a barreira de 1 μm a 5 μm , em direção a escalas *submicron*.

Encapsulamento

Além de vencer os desafios de construção, o tempo de vida e a confiabilidade dos produtos devem ser prolongados. Para tanto, é necessário que o substrato e o encapsulamento possuam baixa permissividade à água e ao oxigênio, além de resistência elevada a variações térmicas, ao calor e à luz ultravioleta (UV) – por exemplo, no silício amorfo, a resistência à luz UV nas células solares é superior a dez anos, e sua eficiência energética é estável ao longo desse tempo, o que ainda não ocorre na célula OPV. Conseguir encapsulamentos flexíveis e transparentes a baixo custo continua sendo um grande desafio [OE-A (2013)].

Substratos não rígidos significam produtos mais robustos. O vidro, por mais leve que seja, apresenta trincas quando sujeito a pressões mecânicas. Conseguir a substituição, por exemplo, do vidro (LCD) usado nos *displays* dos *smartphones*, *tablets* e computadores pelos *displays* OLED certamente irá conferir aos produtos maior resistência a quedas. Outros benefícios seriam: maior leveza, menor espessura, facilidade no transporte e maior facilidade em montagem do produto acabado.

Os desafios não podem ser tratados independentemente. Melhores materiais podem reduzir os requisitos de encapsulamento. A resolução depende das técnicas de produção envolvidas e da vazão necessária para atingir-se a economia de escala na aplicação (OPV, OLED iluminação, OLED *displays*, etiquetas RFID etc.). Portanto, as variáveis aqui levantadas pretendem mostrar brevemente a complexidade de buscar soluções tecnológicas para um ambiente bastante heterogêneo em área de conhecimento que viabilizem as aplicações de EO.

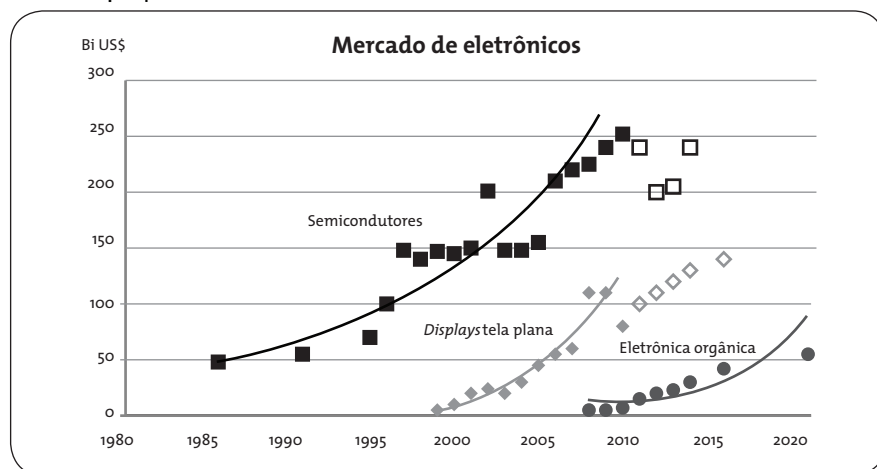
Panorama do mercado mundial

Segundo OE-A (2013), a EO acabou de passar pelo período de euforia de meados dos anos 2000, quando se imaginava que rapidamente haveria uma revolução para o paradigma de produção de dispositivos orgânicos e integração destes em roupas, pessoas etc. O processo excessivamente empurrado pela tecnologia (*technology push*), com pouca visão sobre a via-

bilidade econômica das soluções apresentadas, bem como a inexistência de ferramenta pronto para integrar diferentes áreas do conhecimento contribuíram para que essa visão não fosse alcançada no prazo vislumbrado.

A visão de longo prazo da OE-A para EO, comparativamente com o ecossistema dos semicondutores e a indústria de *displays* tradicionais, pode ser vista no Gráfico 1.

Gráfico 1 | Expectativa de crescimento do mercado de EO



Fonte: BNDES, adaptado de OE-A (2013).

O quadro geral indica que atualmente a EO está no ponto em que precisa superar a etapa de demonstração da tecnologia e avançar para operações em nível piloto. Entretanto, tal quadro varia de acordo com o grau de amadurecimento tecnológico (materiais, componentes, dispositivos etc.) em cada uma das áreas de aplicação [OE-A (2013)].

O primeiro passo para o estabelecimento das cadeias produtivas foi dado com a introdução da produção em massa de *displays* OLED. Todavia, para uma consolidação da EO, é necessário desenvolver outras “aplicações matadoras” (*killer applications*), sejam elas em substituição a outras existentes, criando novas aplicações, sejam elas se combinando com as existentes para trazer melhorias funcionais ou de custo.

Existem diversas organizações mundiais tentando realizar as previsões de mercado para EO. Porém, dado o nível de incertezas inerentes a uma plataforma tecnológica emergente, há ainda muita divergência entre essas

estimativas (*vide* Quadro 3). Também pelo mesmo motivo, não há um recorte claro sobre as estatísticas, com organismos internacionais e consultorias considerando os mercados de EO (*organic electronics*), EO para grandes áreas (OLAE), EI ou potencialmente impressa (*printed electronics*), eletrônica plástica (*plastics electronics*), entre outras nomenclaturas.

Quadro 3 | Estimativas de mercado global em EO

Consultoria/estudo	Curto prazo	Longo prazo	Comentários
Smithers –Printing Industry Research Academy (PIRA) – 2013	US\$ 7 bilhões a US\$ 9 bilhões (2012)	US\$ 190 bilhões (2025)	<i>Displays</i> OLED serão a maior aplicação.
IDTechEx – 2013	US\$ 16 bilhões (2013)	US\$ 77 bilhões (2023)	Mercado por aplicação: • <i>Displays</i> OLED: 84% (US\$ 65 bilhões); •OPV: 6,5% (US\$ 5 bilhões); •Iluminação OLED: 1,7% (US\$ 1,3 bilhões).
Transparency Market Research – 2012	US\$ 8,2 bilhões (2012)	US\$ 44 bilhões (2018)	<i>Displays</i> OLED serão a maior aplicação (US\$10 bilhões em 2018); concentração de receitas na Ásia (50%), seguida da Europa.

Fonte: BNDES, adaptado de Smithers-PIRA (2013), IDTEchEx (2013) e Transparency Market Research (*apud* PRNewsWire-2012).

Importante ressaltar que, apesar de diferirem muito entre si em suas estimativas nominais, há um padrão de crescimento estimado do mercado da EO, que seria lento até 2016-2017 e, a partir daí, exponencial.

Segundo o relatório Electronics CA Publications, há mais de 3 mil organizações em atividade relacionada à EO pelo mundo, entre as quais figuram líderes em outros mercados – como BASF, Corning, Kodak, Merck, OSRAM, Philips, Samsung, Seiko, TDK, Pioneer – e empresas nascentes ou *spin-offs* de grandes multinacionais, como Aixtron, Cambridge Display Technologies (CDT), Poly-IC, Plastic Logic, Univision Technology, Oled Technologies & Solutions (OTS), entre outras.

Dependendo da aplicação, espera-se que, entre cinco a vinte anos, a EO consiga começar a ter destaque na indústria eletrônica mundial. Esse horizonte de tempo é importante oportunidade para o país se posicionar como

um participante nessa indústria. A seguir (Quadro 4), serão apresentadas as previsões de mercado para cada um dos principais segmentos da EO, bem como o estágio atual de lucratividade das aplicações e tendências de evolução no curto-médio prazo.

Quadro 4 | Estado de comercialização da EO em 2013

	Aplicações	Tempo de desenvolvimento	2013	Rentável	Crescimento
<i>Displays</i>	<i>Displays</i> OLED	Quinze anos	US\$ 10 bilhões	✓	↗
Iluminação	Iluminação OLED	Cinco anos	US\$ 15 milhões	✗	↗
Eletrônicos e componentes	Sensores	Dez anos	US\$ 160 milhões	✓	↗
Fotovoltaico	Filmes fotovoltaicos orgânicos/ DSSC	Dez anos	Sem dados	✗	→

Fonte: BNDES, adaptado de IDTEchEX (2013).

OLED displays

Posicionamento da tecnologia

Os *displays* OLED representam mais de 85% no mercado projetado para EI em 2023 [IDTEchEx (2013)]. Os fornecedores de *displays* LED-LCD estão sob maior risco com a viabilidade econômica dos *displays* OLED. As vantagens dos *displays* OLED sobre os atuais de LED *backlight* LCD podem ser resumidas em: (1) melhor imagem, melhor contraste, cores mais vivas e melhor taxa de *refresh*; (2) menor consumo de energia; (3) melhor ângulo de visão; (4) possibilidade de ser construído de forma curva, flexível, dobrável e em substratos transparentes, pois não precisam do *backlight*; (5) mais finos e leves.

Inicialmente comercializados em massa em *displays* pequenos – *smartphones*, câmeras fotográficas etc. –, os *displays* OLED tendem a avançar sobre aplicações maiores, como TVs e monitores. Os recentes investimentos anunciados pela LG para construção de uma fábrica de geração 8, que permitiria a produção econômica de TVs de 55 polegadas, indicam que os principais desafios tecnológicos vêm sendo superados.

Os grandes fabricantes usam processo de produção baseado na evaporação a vácuo utilizando pequenas moléculas,¹¹ no qual o desperdício de material e a dificuldade de escalar a produção em baixos custos são questões ainda a serem vencidas. Além dessas barreiras, há também o desafio de garantir uma vida útil do material orgânico compatível com o uso de dez ou mais anos de TV.

Panorama competitivo

Como uma das tecnologias críticas que garantem vantagem competitiva na indústria eletrônica – uma vez que boa parte dos produtos hoje em dia carrega algum tipo de *display* embarcado nos mais diversos setores da economia (eletrônica de consumo, automotivo, aeroespacial, defesa etc.) –, os *displays* historicamente tiveram a liderança do desenvolvimento das tecnologias nos EUA, Europa e Japão. Na tecnologia vigente do LCD, a despeito de a produção ter se deslocado para o Sudeste Asiático, a PI dos insumos e equipamentos manteve-se em boa parte com esses três atores [IDTEchEx (2013)].

O OLED parece ser uma ruptura nesse paradigma, com as empresas do Sudeste Asiático, especialmente as coreanas LG e Samsung, liderando o desenvolvimento tecnológico e a produção de dispositivos e produtos para *displays* OLED, puxadas pela crescente adoção dessa tecnologia em *smartphones* e *tablets*. A aquisição de fornecedores-chave, como a Novaled,¹² e participação de 5% na Sharp, pela Samsung, e a divisão OLED da Kodak, pela LG, exemplificam como a participação dessas empresas nos insumos críticos deverá ser sensivelmente maior do que foi no LCD. Ambas lançaram, a partir de 2013, TVs OLED de grande dimensões (entre 55” e 77”), flexíveis ou curvas, reforçando o comprometimento desses dois maiores fabricantes de *displays* e TV do mundo.

As empresas taiwanesas como a CMI e a AUO¹³ bem como as chinesas BOE, China Star e Visionox e as japonesas TDK e Pioneer também

¹¹ Uma das exceções que podem ser destacadas seria a Panasonic, que produz *displays* a partir da tecnologia impressa (*inkjet*) de polímeros da CDT/Sumitomo [IDTEchEx (2013)]. Todavia, em 2013, Sony e Panasonic desfizeram uma *joint venture* para fabricar painéis OLED com a tecnologia PLED. Fonte: <<http://news.oled-display.net/sony-and-panasonic-stop-their-oled-tv-partnership/>>. Acesso em: ago. 2014.

¹² Empresa alemã que participou dos esforços de desenvolvimento da comunidade europeia nos FP6 e FP7 para tecnologia de OLED e foi comprada pela Samsung em 2013.

¹³ Terceiro e quarto maiores fabricantes de painéis do mundo.

concorrem no mercado de *displays* OLED, embora ainda estejam majoritariamente focadas em *displays* de menor tamanho.

Apesar de ainda caros e com desafios tecnológicos e produtivos a serem superados, os *displays* já ultrapassaram a barreira “*lab-to-fab*”, já tendo se consolidado com produção em escala. De acordo com IDTEchEx (2013), as receitas com *displays* OLED devem alcançar US\$ 30 bilhões em 2020.

Perspectiva para o Brasil

Como será apresentado no item “Modelos de desenvolvimento”, em meados dos anos 2000, o governo brasileiro tinha como estratégia a entrada no segmento de *displays* OLED baseado em polímeros (PLED) – tecnologia esta que ao menos atualmente está sendo superada no mercado pelas pequenas moléculas (SMOLED).

Todavia, segundo a Gartner, as empresas de *displays* já estão trabalhando em escala laboratorial em processo de produção impresso – embora a consultoria IDTEchEx acredite que o processo de aprendizado será longo [IDTEchEx (2013)]. Nesse cenário, é provável que os investimentos necessários para uma fábrica caiam da ordem de bilhões para milhões, abrindo nova oportunidade de produção local no Brasil.

Iluminação (OLED *lighting*)

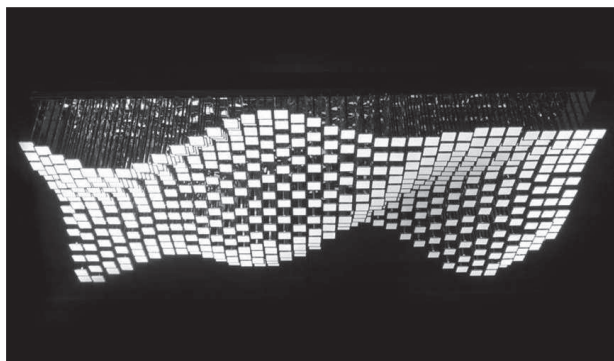
A Iluminação responde por cerca de 20% do consumo de energia nos EUA [US DoE (2013)], e as tecnologias de estado sólido de iluminação – tal como o Light Emitting Diode (LED) e o Organic Light Emitting Diode (OLED) – têm o potencial de reduzir em até 217 TWh até 2025, razão pela qual são classificadas como tecnologias estratégicas não só pelo governo americano, mas também pelos governos de outras regiões do mundo.

Posicionamento da tecnologia

OOLED apresenta alguns atributos especiais (conforme mostra Quadro 5) que o qualifica como tecnologia promissora de iluminação, entre os quais a possibilidade de construção de luminárias de grandes áreas com baixo consumo energético, baixo brilho, *designs* diferenciados, cores ajustáveis

e mornas, utilizando materiais ambientalmente sustentáveis,¹⁴ e principalmente, com potencial de custos extremamente reduzidos via processo de produção em rolo (R2R).

Figura 8 | Luminária OLED



Fonte: ©CERTI.

Para alcançar a potencialidade de seus atributos, há barreiras a serem superadas, entre as quais o incremento da eficácia luminosa (*lumens/watt*)¹⁵ e da vida útil do elemento orgânico, além da redução do custo de produção. Essa tarefa se torna mais árdua na medida em que ocorrem avanços no LED, reduzindo os ganhos que o OLED pode proporcionar, como a possibilidade de aplicação em superfícies não planas por meio de guias de ondas (*waveguides*) [IDTEchEx (2013)].

Ainda assim, o OLED é tido como uma tecnologia complementar ao LED, pelo fato de a luz gerada ser difusa (não focal), permitindo conforto visual ao se olhar diretamente para a fonte e reduzindo as sombras provocadas por uma luz pontual, pela qualidade da luz e pelas possibilidades de *design* a partir de superfícies homogêneas de luz que pode gerar.

¹⁴ Lâmpadas fluorescentes utilizam mercúrio.

¹⁵ O US DoE (2013) posiciona como meta a taxa de 190 lm/W para o OLED em 2025.

Quadro 5 | Comparativo entre os diferentes tipos de iluminação

	Descrição	Eficácia luminosa (lm/W)	Tempo de vida (h)	Vantagens	Desvantagens
	HID (descarga de alta intensidade) Metal Halide	As lâmpadas de <i>metal halide</i> são mais eficientes que as de vapor de mercúrio e as halógenas	50-100 6.000-12.000	Excelente para iluminação externa e interna (com tetos altos) Luz branca mais semelhante à luz natural	Poluição: utiliza mercúrio e argônio Alto custo para fabricação
	<i>Low pressure sodium</i>	São lâmpadas com bastante eficácia	100-200 16.000-20.000	Maior eficácia Excelente para iluminação externa Permite religamento a quente da lâmpada	Monocromática Controle óptico Descarte da lâmpada Potência sobre tempo de vida
	Fluorescente linear	Bastante popular em escritórios, indústria	50-100 10.000-16.000	Alta eficiência Alta eficácia em operação em alta frequência Grande variedade de escolha de cores	Requer o reator Luz tem sensibilidade à temperatura ambiente Utiliza mercúrio
	Fluorescente compacta	Facilidade de uso com a facilidade incandescente	40-65 6.000-12.000	Tamanho compacto Alta eficácia Alta CRI Longo tempo de vida Excelente manutenção do lúmen	Sensibilidade térmica <i>Position sensitive</i> Requer reator (embutido) Custo inicial superior à incandescente
	Incandescente	Mais popular nas residências e comércios	5-15 1.000	Baixo custo inicial Baixo custo de dimerização Temperatura da cor (alta renderização)	Menor eficácia Sensível à voltagem Pequeno tempo de vida Geração de calor

(Continua)

(Continuação)

	Descrição	Eficácia luminosa (lm/W)	Tempo de vida (h)	Vantagens	Desvantagens
LED	Iluminação por estado sólido (semicondutor)	20-120	20.000-100.000	Baixo consumo de energia Longa durabilidade Pouca geração de calor <i>Design</i> modular Baixo custo de fabricação Grande resistência a choques, vibração	Lâmpadas LED ainda caras Luz focada Cor da luz
OLED	Iluminação por estado sólido (semicondutor orgânico)	50	Ainda em desenvolvimento	Baixo consumo de energia Baixo custo de operação Luz difusa (diferente do LED) Temperatura da cor	Módulos ainda caros

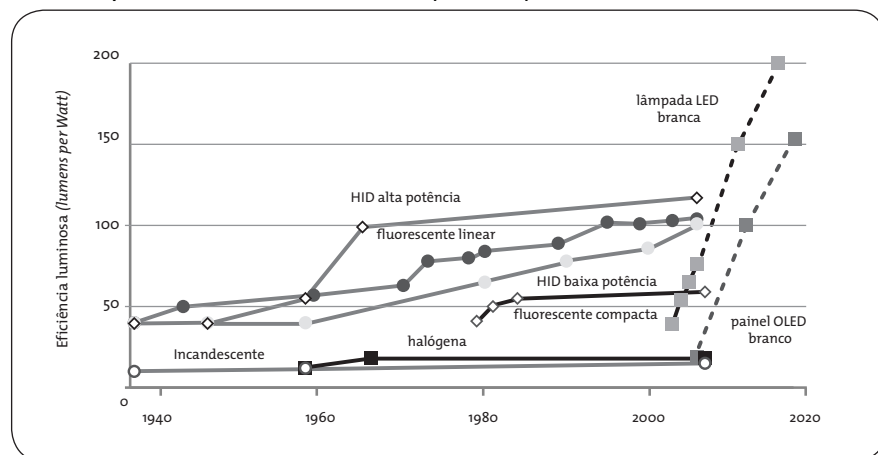
Fonte: BNDES, adaptado de Bardsley (2014) e Edson Tech Center (2014).

Todavia, além dos ganhos em eficiência luminosa e vida útil, os filmes ainda necessitam ser produzidos em grandes áreas a baixos custos – os protótipos atuais ficam em torno de 100 cm², produzidos em processo de folha a folha [US DoE (2013)].

Atualmente, as luminárias OLED não podem ser usadas como fonte primária de iluminação dos ambientes em razão de sua limitada potência e alto custo e estão sendo utilizadas mais em aplicações decorativas. A entrada da tecnologia no mercado deverá ser feita em nichos onde a sensibilidade ao preço e tempo de vida não sejam atributos tão prioritários quanto o *design* e a criatividade dos projetos. Espera-se que os primeiros mercados alcançados pela tecnologia sejam os segmentos de hospitalidade – hotéis, clubes etc. –, *shopping*/comércio, arquitetura em geral e automotivo.

Com a queda dos custos de produção, a expectativa é de uma penetração razoável também no segmento residencial. No longo prazo, caso os OLEDs se tornem competitivos em custos e eficiência, poderiam penetrar nos segmentos empresarial e industrial (Gráfico 2).

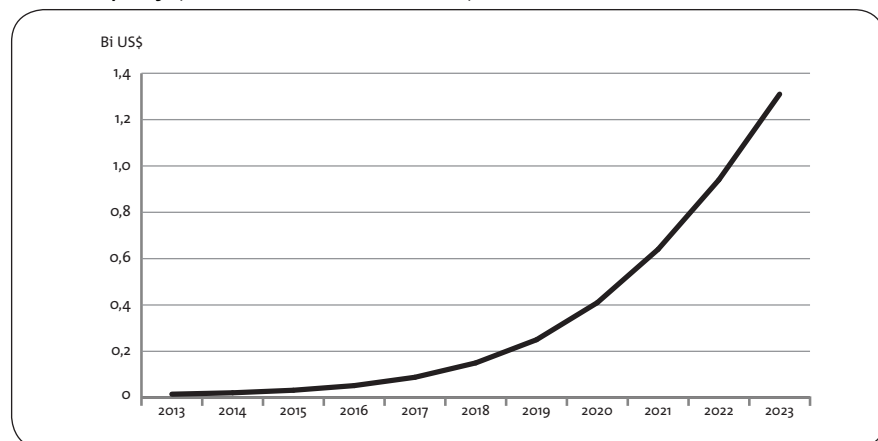
Gráfico 2 | Eficácia luminosa histórica e prevista para as fontes de luz



Fonte: US DoE (2013).

Panorama competitivo

Gráfico 3 | Projeção de mercado de iluminação OLED



Fonte: IDTEchEx (2013).

Espera-se que o mercado atinja US\$ 1,3 bilhão em 2023, quando apresentará ainda uma pequena fração dos US\$ 25 bilhões esperados para a tecnologia LED (Gráfico 3).

O desenvolvimento da cadeia de OLED para iluminação vem se beneficiando dos investimentos realizados na indústria de *displays* OLED, pois a maioria dos fabricantes mundiais dessa indústria utilizam pequenas moléculas, os SMOLEDs, o que vem reduzindo os custos de materiais e equipamentos de produção pelo efeito da escala, com um número crescente de fornecedores de materiais com pureza comparável.

Dentre as fabricantes de painéis e luminárias, destacam-se as europeias Philips e OSRAM, que disputam a fronteira do desenvolvimento da tecnologia com empresas asiáticas como a LG Chemicals – que já comercializa luminárias OLED com níveis de eficácia de 60 lm/W –, Konica Minolta, Panasonic, Sharp, CDT/Sumitomo,¹⁶ entre outras. Dessas, US DoE (2013) identifica que apenas a LG possui linha de produção já voltada para comercialização de produtos finais, ao passo que as demais comercializam produtos a partir de linhas de P&D.

Há uma expectativa de que o OLED para iluminação entre no mercado efetivamente entre 2018 e 2020 quando o custo total de fabricação do painel em US\$/m² deve cair de US\$ 6.000/m² em 2013 para US\$ 1.000/m² em 2020, como função de aumento de escala, substituição dos PhD das linhas de produção por técnicos, redução dos custos dos materiais etc. Além disso, a Convenção Mimata – pacto das Nações Unidas para limitar o uso e a emissão de mercúrio internacionalmente, firmado em 2013 – estabeleceu que devem ser banidas até 2020 as lâmpadas compactas fluorescentes de até 30 W, que ultrapassam 5 mg de mercúrio, e algumas lâmpadas fluorescentes tubulares (halofostato de cálcio). Portanto, as luminárias OLED podem se beneficiar dessa mudança no mercado.

Perspectivas para o Brasil

Analisando-se os diferentes elos da cadeia de valor apresentados na seção “Cadeia de valor”, fazem-se a seguir algumas análises sobre possíveis oportunidades para o país.

¹⁶ Talvez a única exceção relevante de tecnologia de polímeros para OLED iluminação.

- **Materiais e processo produtivo** – como o processo produtivo mais propagado atualmente se baseia em moléculas pequenas e deposição a vácuo, que demandam escala, eleva-se a barreira de entrada para investimentos fabris na área. Soma-se a esse fato a presença de grandes fabricantes de fontes de luz, como Philips, OSRAM e LG investindo valores consideráveis nessa tecnologia. Por outro lado, os avanços obtidos no processo de *displays* serão incorporados por esses fornecedores de materiais e processos de produção para iluminação, o que tende a aumentar a concorrência na área. Posto isso, parece pouco provável que haja oportunidades para o país alcançar o passo (*leapfrog*) do *core* dessa tecnologia em processo ou materiais. Contudo, há que se levar em conta uma estratégia de atração de investimentos nessas áreas, ainda mais se considerado o *roadmap* produtivo em processo contínuo (R2R), quando os valores de investimentos deverão ser relativamente baixos.
- **Dispositivos e aplicação** – dados os recentes desenvolvimentos da tecnologia LED quanto a consumo, vida útil e qualidade de cores, o horizonte de médio prazo aponta para uma aplicação de nicho de alto valor agregado para o OLED em iluminação, em que a qualidade de uma luz distribuída uniformemente possa ser valorizada, como no setor moveleiro, automotivo, aeronáutico, entre outros. O desenvolvimento de luminárias e novas estruturas de encapsulamento parece ser uma grande oportunidade para o Brasil, haja vista a diversidade industrial presente no país, com a possibilidade de desenhar produtos (carros, móveis etc.) considerando os ganhos que a iluminação OLED pode oferecer.

Para apoiar esse desenvolvimento tecnológico, há um conjunto de institutos de tecnologia que trabalham com tecnologia OLED para iluminação, destacando-se o Inmetro, que possui maquinário para fabricar em escala protótipo OLEDs de 10 cm x 10 cm.

O BNDES apoiou recentemente um projeto envolvendo a CERTI e a Philips, no qual a instituição tecnológica brasileira: (1) construiu uma tecnologia de encapsulamento do OLED fornecido pela Philips e luminárias-conceito; (2) iniciou o desenvolvimento de mercado junto a fabricantes de mobiliários; e (3) estruturou um laboratório e linha-piloto para interconexão, montagem e encapsulamento das fontes de luz, assim como a cadeia de fornecedores nacionais da eletrônica embarcada e do encapsulamento.

Entre outros resultados, foram criadas a placa controladora da luminária *living sculpture*, apresentada na Euroluce 2013, em Milão, que integra portfólio da Royal Philips (Figura 8) e já recebeu encomendas pela Philips Internacional; e a luminária para mobília *undershelf light*, lançada na feira Euroshop 2014, em Düsseldorf.

Outro subproduto desse projeto foi o desenvolvimento local de um filme PDMS, que está restrito ao ambiente laboratorial atualmente, mas que potencializa em até 36% [Vicente (2014)] a eficiência luminosa do OLED fornecido pela Philips. Estudos realizados com parceiro tecnológico do projeto, o Centro de Tecnologia da Informação (CTI) Renato Archer, e com a rede CI Brasil apontam para interessantes arquiteturas da eletrônica de acionamento e *chips* dedicados para agregação de funcionalidades e valor aos OLEDs. Além de posicionarem o país como alternativa para a Philips escalar a tecnologia de produção, os investimentos do projeto capacitaram e equiparam a CERTI para desenvolvimentos futuros em produtos baseados em células fotovoltaicas orgânicas (OPV), tema do próximo tópico. A seguir, no Quadro 6, uma análise estratégica para o país atuar no segmento de iluminação OLED.

Quadro 6 | Análise SWOT¹⁷ do OLED *lighting* para o Brasil

Forças	Fraquezas
<ul style="list-style-type: none">• CERTI-Philips: Projeto bem-sucedido em parceria com grande <i>player</i>• Estrutura de P&D (ex.: Inmetro)• Existência de clientes locais (indústria moveleira, <i>designers</i> etc.)• Fontes de recurso para P&D – BNDES e Finep	<ul style="list-style-type: none">• Dificuldade de retenção de mão de obra• Dificuldade de articular projetos existentes e concentrar recursos de P&D• Ainda que em construção, cadeia produtiva encontra-se fora do Brasil (principalmente Europa)
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none">• Atração de investimentos em OLEDs (Philips ou concorrentes)• Desenvolvimento local de luminárias OLED e outros elos da cadeia (ex.: drivers)	<ul style="list-style-type: none">• OLED pode não se consolidar no mercado e atingir processo de produção R2R• Concorrentes avançam mais rapidamente

Fonte: BNDES.

¹⁷ Strengths, Weakness, Opportunities, Threats (Força, Fraqueza, Oportunidade e Ameaça).

Células fotovoltaicas orgânicas (OPV)

Posicionamento da tecnologia

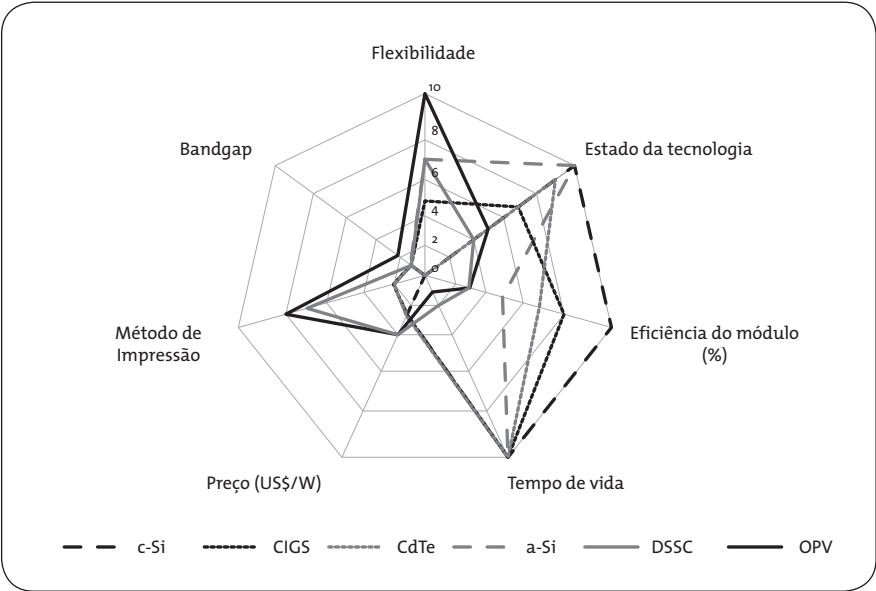
Quadro 7 | Comparativo entre tecnologias de energia solar

	Silício	Silício (Si) amorfo		Células junção (III-V)	Filmes finos		Orgânico
	c-Si (cristalino)	a-Si	DSSC	GaAs (<i>single junction</i>)	CdTe	CIGS	OPV
Eficiência da célula em laboratório	24,7% (Panasonic)	13,4% (LG Electronics)	11,4% (NIMS)	29% (Alta Devices)	18,7% (First Solar)	20,4% (EMPA)	12% (Heliatek)
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência alta •Disponibilidade de material (cSi) •Alto tempo de vida da célula •Processo de reciclagem •Sem toxicidade 	<ul style="list-style-type: none"> •Tecnologia madura •Fábricas disponíveis •Possibilidade de módulos flexíveis 	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência energética mais imune à variação de temperatura •Baixo custo de produção •Módulos flexíveis e pouca espessura •Uso indoor •Transparência/ colorido 	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência alta •Resistente à radiação UV (uso em satélites) •Módulos de pouca espessura 	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência média (12%-16,5%) •Fácil processamento •Baixo custo de fabricação 	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência alta (16%-20,3%) •Possibilidade de módulos flexíveis •Baixo custo de produção 	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência da taxa de conversão energética mais imune à variação de temperatura •Eficiência pouco afetada pela inclinação da incidência solar •Possibilidade de baixo custo de produção •Módulos flexíveis e pouca espessura •Uso indoor •Transparência
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> •Eficiência da taxa de conversão energética variável com o aumento de temperatura •Qualidade do material baixa (defeitos de cristal + impureza) 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência do módulo (10%-12,1%) •Efeito de degradação induzido pela luz •Processo de manufatura de alto custo 	<ul style="list-style-type: none"> •Eletrodo líquido muito suscetível à variação de temperatura •Degradação com UV 	<ul style="list-style-type: none"> •Mais pesado que o silício •Alto custo de produção 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de escassez da matéria-prima •Atualmente, módulos rígidos apenas •Toxicidade e reciclagem •Custo e escassez (Te, Cd) 	<ul style="list-style-type: none"> •Tecnologia complexa •Diferentes tecnologias e reciclagem •Custo e escassez (In, Se) 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência ainda menor que as demais tecnologias, mas evoluindo •Degradação com UV

Fonte: BNDES, adaptado de PV: research and applications (2011) e Science & Technology trends.

As tecnologias fotovoltaicas podem ser classificadas em: (1) silício cristalino, utilizado em quase 88% dos módulos [Wolden *et al.* (2010)]; (2) filmes finos inorgânicos (a-Si, DSSC, CdTe, CIGS); (3) filmes finos orgânicos (OPV); (4) semicondutores III-V, utilizados em satélite e condensadores de energia. As principais vantagens e desvantagens são apresentadas no Quadro 7.

Gráfico 4 | Comparativo das diferentes tecnologias FV



Fonte: BNDES, adaptado de IDTechEX.

Comparando as diferentes tecnologias fotovoltaicas sob os aspectos de eficiência do módulo, estado da tecnologia, tempo de vida, preço (US\$/W), flexibilidade, uso do método de produção por impressão, *bandgap* (vide Gráfico 4), percebe-se que o OPV destaca-se por oferecer flexibilidade e possibilidade de produção por impressão e tem desafios para vencer a eficiência e o tempo de vida da célula [IDTechEx (2014)].

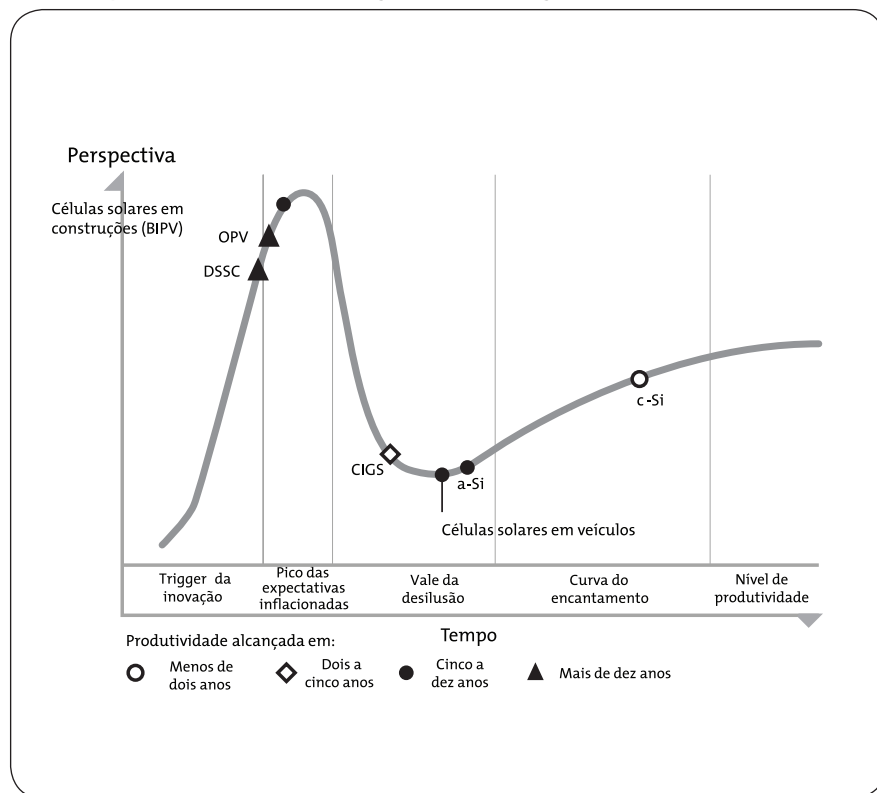
O Gráfico 6 mostra a evolução na eficiência das células fotovoltaicas. Observa-se que o OPV, apesar de ainda apresentar a menor eficiência, foi o que conseguiu elevá-la de forma mais significativa nos anos recentes.

A construção de células orgânicas é realizada utilizando-se ou a construção de multicamadas ou por meio da mistura de materiais em escala

nanométrica. A primeira técnica é utilizada para processos de produção a vácuo (por exemplo, Heliatek), enquanto a segunda se aplica a métodos de produção por materiais processáveis ou impressão (por exemplo, CSEM Brasil e Beletric).

Acredita-se que, ao conseguir superar a barreira “psicológica” dos 10-10 (10% de eficiência e dez anos de tempo de vida), será possível tornar as células solares orgânicas bastante competitivas no mercado de geração fotovoltaica de filmes finos, particularmente porque os custos de manufatura esperados são muito pequenos. Considerando os materiais e dispositivos existentes, o *payback* energético do OPV é estimado entre 0,3 a 3 anos¹⁸ [Wolden *et al.* (2010)].

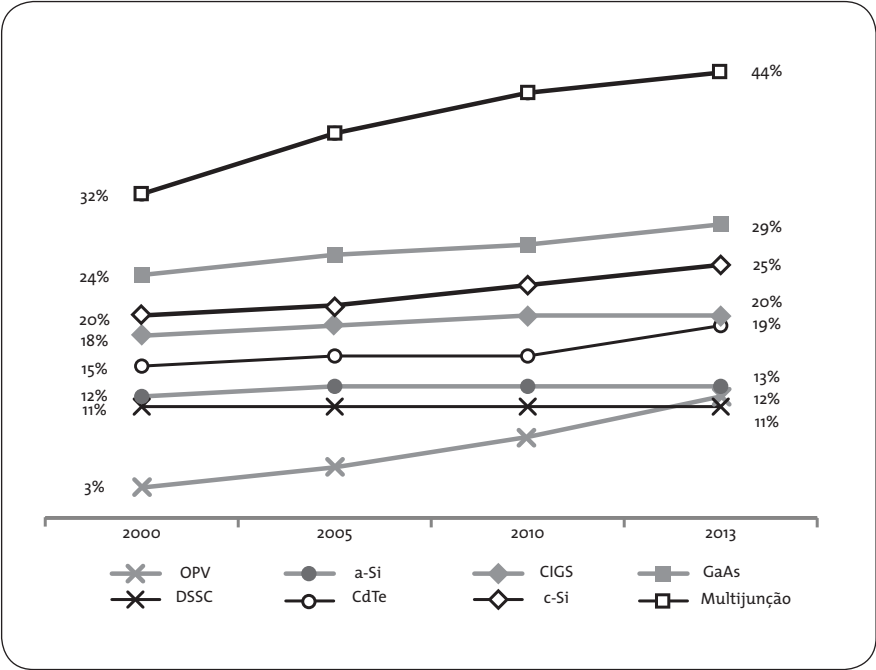
Gráfico 5 | Maturidade das tecnologias solares e algumas aplicações



Fonte: Gartner Hype Cycle 2013.

¹⁸ Essa faixa elevada de tempo deve-se ao grau de premissas usadas a essa tecnologia em maturação.

Gráfico 6 | Evolução de eficiência da célula (%)



Fonte: BNDES, adaptado de National Research Energy Labs (NREL).

Todavia, os atributos de peso reduzido, flexibilidade, semitransparência (e transparência controlada), facilidade de integração com outros produtos, baixo impacto ambiental durante o processo de fabricação e operação e, fundamentalmente, a perspectiva de fabricação em custos significativamente menores comparados com tecnologias inorgânicas criam nichos de aplicação que não podem ser avaliados por parâmetros “tradicionais” de eficiência como quando integrados a janelas de prédios, carros, sobre estruturas leves e em superfícies sensíveis, como em lagos e represas. Por esse motivo, as métricas comumente utilizadas para avaliar a evolução da tecnologia são outras, como energia gerada por peso (W/kg), por área (W/cm²), por watt gerado no pico energético (W/Wpic), vida útil na aplicação (tempo), entre outras.

Para se tornar uma tecnologia madura, o OPV ainda precisa superar desafios relacionados à estabilidade e ao encapsulamento dos materiais orgânicos, além de transpor o processo laboratorial para o industrial em grandes módulos.

Panorama do mercado

Dado o grau de maturidade da tecnologia, as perspectivas do IDTEchEx são de operação em nichos por pelo menos dez anos alcançando US\$ 86,5 milhões em 2023. Essa estimativa aparentemente é conservadora, já que novas aplicações em desenvolvimento, como os módulos OPV flutuantes em superfície de lagos bem como colocados sobre os tetos de automóveis, podem elevar as previsões de mercado atuais.

As empresas formadas para explorar o mercado de OPV são jovens, tendo a Konarka representado um marco para o avanço da tecnologia e, por outro lado, uma ruptura no desenvolvimento do mercado ao ter declarado falência em 2012.¹⁹ Essa empresa, fundada pelo prêmio Nobel Alan Heeger, recebeu mais de US\$ 170 milhões em capital de risco e mais de US\$ 20 milhões em recursos governamentais e chegou a atingir eficiências produtivas superiores a 8%. Com um *hall* de tecnologias na área de polímeros impressos, parte das patentes da Konarka foi adquirida pela Merck.

Em outra rota tecnológica, a de moléculas pequenas, a alemã Heliatek²⁰ afirma ter alcançado eficiência de 12%, em 2013, ante 6%, em 2009, demonstrando a rápida evolução da tecnologia. A empresa tem parceria com a AGC, uma das maiores empresas de vidro do mundo para o fornecimento de painéis solares integrados (BIPV) às janelas para construção civil.

Figura 9 | Painéis solares integrados (BIPV)



Fonte: © CSEM Suíça.

¹⁹ Após ser envolvida nos debates políticos para a eleição presidencial sobre os milionários incentivos para a indústria solar, a falência da Solyndra e o default de cerca de US\$ 500 milhões de empréstimos públicos [SI Staff (2008)].

²⁰ Que tem, entre outros acionistas de venture capital, a Basf e Bosch.

As americanas Solamer e Plextronics, as europeias Armor, Eight19, Disa Solar entre outras, compõem um quadro geral de empresas pequenas e médias nascentes, com grandes desafios tecnológicos e diferentes processos de produção e propostas de valor.

Perspectivas para o Brasil

As dificuldades financeiras da Konarka abriram uma oportunidade para um projeto de desenvolvimento de OPV em processo R2R que está sendo conduzido pelo CSEM Brasil, que possui equipe formada por profissionais com experiência na própria Konarka, além da Kodak, IBM, Universal Display Technologies e ARM. Esse projeto possui apoio financeiro do governo de Minas Gerais, financiamento do BNDES e do fundo de capital de risco FIR e está posicionado entre os mais avançados processos de produção em impressão contínua pela Merck, talvez a principal fornecedora de polímeros para EO.

O OPV já apresenta alguns modelos de comercialização que podem rentabilizar os primeiros investimentos, principalmente em aplicações *offgrid* – painéis integrados em bolsas, exército e defesa civil etc. – e encapsuladas em vidro (que aumentam a vida útil), como em teto solares de automóveis e janelas de edifícios. Todavia, há ainda aspectos técnicos a serem superados, e a cooperação entre empresas e a possível consolidação setorial poderão ser relevantes para enfrentar os desafios de desenvolver a tecnologia, escalar a produção e desenvolver mercados.

O Quadro 8 apresenta uma matriz FOFA para entrada do Brasil em OPV.

Quadro 8 | Análise SWOT para OPV no Brasil

Forças	Fraquezas
CSEM Brasil: projeto na fronteira tecnológica mundial, com equipe qualificada e parcerias tecnológicas com principais centros de P&D	Dificuldade de retenção de mão de obra
Elevada incidência solar	Dificuldade de articular projetos existentes e concentrar recursos de P&D
Existência de clientes locais (indústria automotiva, de vidro, agentes do setor elétrico etc.)	Atrair empresas com porte para levar soluções ao mercado

(Continua)

(Continuação)

Forças	Fraquezas
Fontes de recurso para P&D – Aneel, BNDES, Finep etc.	Ainda que em construção, cadeia produtiva encontra-se fora do Brasil (principalmente Europa)
Oportunidades	Ameaças
Janela de oportunidade tecnológica relativamente ampla	Tecnologia OPV pode não se consolidar no mercado ou haver desistência de grandes fornecedores de insumos (polímeros)
Baixo interesse das grandes empresas mundiais (concorrência)	Concorrentes em OPV avançam mais rapidamente
Consolidar parceria ou fusão/aquisição de concorrentes	Outras rotas tecnológicas se consolidam (produtos substitutos)

Fonte: BNDES.

Sistemas inteligentes integrados e componentes eletrônicos

Posicionamento da tecnologia

O custo de componentes eletrônicos-chave (circuitos integrados, sensores, baterias etc.) tende a corresponder à maior parcela do custo de todos os componentes dos dispositivos eletrônicos, especialmente os de menor complexidade (capacidade de processamento e armazenamento). Baterias, memórias, processadores, sensores, transmissores (RFID) e outros circuitos em EO e EI possibilitam o desenvolvimento de sistemas integrados inteligentes em novos substratos e em custos baixos. Roupas, embalagens e etiquetas com capacidade de interagir com o ambiente, produtos e pessoas abrem uma gama de possibilidades, especialmente onde os dispositivos utilizados atualmente possuem mais capacidade do que a necessária para desempenhar funções simples, como em brinquedos, cartões de embalagens etc. [Gartner (2012)].

Uma área de aplicação com boas perspectivas já no curto prazo é a de **sensores**, que, apesar de madura em silício, pode ser uma grande oportunidade para a EO e a EI em virtude de sua flexibilidade, conformidade, moldabilidade e viabilidade de construção em grandes áreas. Nestas últimas, por exemplo, possibilita a criação de redes de sensoriamento para monitorar as estruturas de um avião como forma de antever desgastes.

Quadro 9 | Potencial dos sistemas inteligentes integrados e componentes eletrônicos

Componente	Potencial	Barreiras atuais
Bateria	Substituição das baterias de “moeda” e aplicações que requerem baterias ultrafinas	<i>Performance</i> , escala (redução de custos) e padronização de tamanhos
Circuitos integrados	Novas aplicações integradas de baixo custo, biocompatíveis etc.	<i>Performance</i> e miniaturização
Sensores	Biossensores, sensoramento de grandes áreas e sistemas integrados	Custos de produção e integração

Fonte: BNDES, adaptado de OE-A.

Apesar de grande esforço dedicado aos transistores orgânicos, as aplicações de EO para memórias, *chips* e transmissores (RFID) e demais circuitos ainda precisam percorrer um longo caminho tecnológico até chegar ao mercado. Como comentado na introdução deste estudo, a EO está em sua infância, especialmente para esses dispositivos de mais alta complexidade. Todavia, o potencial de alcançar um processo produtivo de baixo custo, personalizável com capacidade de impressão em superfícies não planas, entre outros atributos, ratifica os investimentos em transistores orgânicos (especialmente impressos), que atualmente estão mais concentrados nos institutos de tecnologia.

As áreas mais promissoras no curto prazo envolvem novas aplicações em **sistemas inteligentes**, como embalagens e etiquetas. A embalagem inteligente consiste de impressão de memória, sensor e lógica, para a detecção de uma determinada propriedade – por exemplo, a temperatura de um alimento sensível a variações térmicas –, e registro do dado sobre o histórico dessa propriedade do produto para futura leitura e exibição (por exemplo, vacinas, vinhos etc.). Aplicações em medicina, como as etiquetas inteligentes aderentes à pele que armazenam pequenas quantidades de medicamentos e os libera ao longo do tratamento médico, monitoramento de diversas doenças (auxiliando no diagnóstico e até acompanhando o tratamento) também são promissores, pois a EO possibilita o uso de substratos flexíveis, transparência, biocompatibilidade e até mesmo serem digeridos pelo ser humano.

Dadas as barreiras iniciais a serem superadas, empresas e institutos, como o holandês Holst, têm apostado em **soluções híbridas**, que combinam a EO

com componentes da eletrônica convencional (de silício). Tal abordagem tende a extrair os benefícios de ambas as rotas tecnológicas e deverá ser especialmente atrativa para os sistemas inteligentes.

Panorama de mercado

O mercado para sensores orgânicos é estimado em US\$ 1 bilhão em 2023, ao passo que o de baterias não chegará a US\$ 200 milhões [IDTEchEx (2013)]. Em ambos os casos, a perspectiva é que a EO e a EI ocupem um percentual diminuto do mercado total.

Empresas baseadas em soluções inteligentes ou são *start-ups* advindas de universidades (como CDT), ou surgiram como *spin-offs* de grandes empresas (como a PolyIC, originada na Siemens), caracterizando o período como um período ainda nascente da tecnologia. Pela mesma razão, diversas empresas encerraram suas atividades com transistores orgânicos (por exemplo, Motorola, Seiko Epson, PrintedSystems e PolymerVision), e outras se reposicionaram (como a PolyIC, que trocou seus investimentos em RFID para uma aplicação mais imediata em filmes condutores transparentes).

Perspectivas para o Brasil

A área de componentes e sistemas eletrônicos orgânicos e impressos apresenta uma grande oportunidade para o país. Dado o estágio atual da tecnologia e a diversidade de dispositivos e produtos que ela pode entregar, entende-se que há uma boa janela de oportunidade, sobretudo quando se trata de dispositivos impressos.

Nos médio e longo prazos, as iniciativas em curso no Brasil baseadas na eletrônica de silício podem convergir para a utilização de eletrônica híbrida e impressa. A Unitec Blue do Brasil (ex-SIX Semicondutores) tem como rota estratégica o desenvolvimento e a produção de dispositivos híbridos (por exemplo, circuitos integrados de fotônica) e de microfluídicos (por exemplo, biossensores).

Modelos adotados para incentivo à EO e à EI

Embora promissoras, EO e EI são áreas do conhecimento extremamente jovens, que demandam amadurecimento tecnológico para que se possam alcançar os mercados de massa com rentabilidade mínima.

Compreendendo esse aspecto fundamental, os países desenvolvidos estão alocando parcelas significativas de recursos para pesquisa e desenvolvimento (P&D) nessas áreas.

Focos estratégicos

A **Europa** está fortemente comprometida com essas áreas, enxergando nelas uma alternativa para construir um novo ecossistema, após a perda da cadeia de semicondutores tradicionais para a Ásia. Entre 2007 e 2013, mais de € 120 milhões de recursos públicos foram aplicados via chamada FP7 para criar o ecossistema (infraestrutura de P&D e arranjos produtivos). Mais de quatrocentas entidades (institutos de ciência e tecnologia, pequenas e grandes empresas) formam mais de 17 *clusters* em 13 países europeus (Alemanha, Inglaterra, Áustria, Suíça, Holanda, França, Finlândia, Grécia) [OE-A (2013)]. A região tem liderança na base da cadeia (materiais orgânicos) e processo produtivo (impressão e deposição a vácuo), contudo enfrenta dificuldades para estimular as gigantes empresas de tecnologias da informação e comunicação – com exceção à área de iluminação OLED. Esse diagnóstico embasa o novo *framework* Horizon 2020, no qual os objetivos da União Europeia se estendem para estimular novos modelos de negócios e empreendedorismo na área.

Por a questão energética ser estratégica para os **EUA**, seu departamento de energia (USDOE) acompanha as áreas de iluminação e energia fotovoltaica. Investimentos significativos foram feitos em tecnologia orgânica, como pela Konarka – falida em 2012 –, e em projetos OLED de iluminação, havendo atualmente maior ênfase em tecnologias inorgânicas, entre as quais o CIGS (fotovoltaico) e LED (iluminação) [IDTEchEx (2013); US DoE (2013)]. Há forte interesse na EI, com liderança mundial no número de produtos impressos já desenvolvidos [IDTEchEx (2013)], e empresas *start-ups* em componentes e sistemas surgindo especialmente no Vale do Silício (Santa Clara e San Jose) e no entorno de universidades fortes no tema (Filadélfia e Massachusetts).

Na Ásia, **Japão** e **Coreia** têm se destacado no principal mercado – *displays* – e também nos esforços de criação do TFT orgânico/impresso para alcançar, nos médio e longo prazos, a produção por impressão de *displays*. Esses avanços serão fundamentais para a evolução da tecnologia de transistores – que possibilitarão a criação de *chips* orgânicos e impressos

com desempenho superior. Nesses países, a presença das grandes empresas é intensa – e menor de *start-ups* –, e elas estão voltadas não somente para o fornecimento de materiais, mas também de equipamentos e produtos finais. Apesar de poucas informações disponíveis, IDTEchEx (2013) entende que, em dez anos, a **China** também estará fortemente presente em EI.

Todavia, todas essas regiões estão desenvolvendo tecnologia de impressão para transistores (por estes se empregarem em diversas aplicações eletrônicas) e fotovoltaicos (pela questão energética) [IDTEchEx (2013)].

Modelos de desenvolvimento

Em todos os países citados, o papel do Estado para organizar, incentivar e principalmente financiar os desenvolvimentos é central. Os institutos de tecnologia estão entre os principais protagonistas, uma vez que a tecnologia ainda tem muito para evoluir até atingir mercados de grandes volumes. E o empreendedorismo é outro elemento incentivado, dada a agilidade das novas empresas em testar os nichos de mercado iniciais.

Na Europa, um modelo muito interessante é o adotado pelo VTT, principal instituto de tecnologia da Finlândia, com papel central no desenvolvimento da Nokia, entre outras empresas. O instituto é responsável pelo amadurecimento da tecnologia, com especial foco no desenvolvimento de soluções híbridas – orgânica e inorgânica – impressas, e tem forte interação e parceria com os demais centros de P&D no mundo, além de realizar a prestação de serviços tecnológicos para as empresas que orbitam o seu ecossistema. Um grande programa para promoção de *start-ups* – incluindo *coaching*, rodadas de *venture foruns*, aceleração etc. – é executado para estimular os novos empreendedores. Em 2014, esse programa já promoveu três *business cases* com 10 mil a 100 mil peças produzidas com base em 18 empresas aceleradas.

Nos EUA, são utilizados os instrumentos tradicionais para inovação: *grants* dos departamentos de energia e defesa – embora relativamente tímidos [IDTEchEx (2013)] –, as universidades e (em poucos casos ainda) os fundos de *venture capital*.

No Japão, a organização e articulação entre academia, institutos de pesquisa e indústria é notória, tendo a Japan Advanced Printed Electronics Technology Research Association (JAPER), com cerca de trinta institutos de P&D, a função de estimular e promover as parcerias necessárias tanto

das grandes quanto das pequenas empresas. Quadro semelhante é encontrado na Coreia, com a Korea Printed Electronics Association (KOPEA) realizando esse papel.

Posicionamento estratégico e oportunidades para o Brasil

Quadro geral da EO no país

Como em diversas outras áreas do conhecimento, ao longo dos últimos vinte anos, o Brasil construiu uma considerável atividade científica em EO. Podem-se citar o Programa de Apoio aos Núcleos de Excelência (Pronex), de 1996, e a criação do Instituto Nacional de Eletrônica Orgânica (Ineo), financiado em sua fundação em 2001 pelo programa Institutos do Milênio. O Ineo congrega 35 grupos de pesquisa, com 65 pesquisadores e mais de duzentos estudantes de mestrado e doutorado, e tem por objetivo consolidar a rede de pesquisadores no país, colocando-se em posição de destaque em relação às pesquisas básicas e de aplicações em EO, fortalecer a pós-graduação na área, difundir a EO trabalhando em parceria com o setor público e privado. Desde 2009, as instituições participantes do Ineo formaram 72 doutores e 140 mestres e publicaram mais de setecentos artigos em jornais indexados internacionais. O objeto das pesquisas realizadas pelo Ineo cobre desde a síntese e purificação de moléculas eletrônicas até a fabricação e caracterização de dispositivos, naturalmente em escala laboratorial.

A Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE) de 2004 definiu a nanotecnologia como uma das áreas portadoras de futuro e, mais recentemente, em 2013, o governo federal lançou a Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia (IBN), com cerca de R\$ 150 milhões de investimento,²¹ destinados para ações em nanoeletrônica, incluindo estruturação de laboratórios, cooperação internacional, subvenção econômica, entre outras destinações.

Além desses recursos, há uma série de outros instrumentos de financiamento que podem ser acessados para desenvolvedores de tecnologia em EO. Desde 2007, o BNDES posicionou a EO como área portadora de futuro, sendo a área foco de apoio do Funtec, fundo de recursos não reembolsáveis para apoio de projetos de tecnologia desenvolvidos por institutos de ciência e tecnologia para empresas intervenientes. Ao todo,

²¹ Fonte: <<http://nano.mct.gov.br/investimentos/>>. Acesso em: 5 jun. 2014.

foram submetidos mais de R\$ 80 milhões em pedidos de apoio na área, envolvendo projetos de *displays* e iluminação OLED, OPV e impressão de antenas para etiquetas RFIDs. Até junho de 2014, o Banco possuía R\$ 47 milhões contratados em EO.

Em 2013, Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), BNDES e Finep – Inovação e Pesquisa lançaram uma chamada conjunta no setor de energia elétrica, buscando combinar os instrumentos de apoio das três instituições – crédito, subvenção, participação acionária e recursos obrigatórios em P&D dos agentes do setor elétrico – em planos integrados de inovação, denominando-se Plano Inova Energia. Com temáticas diversas, ao todo, foram aprovados cerca de R\$ 3,6 bilhões, dos quais R\$ 57 milhões foram destinados a um plano de inovação para desenvolvimento de tecnologia fotovoltaica orgânica (OPV), tendo sido esse plano contemplado inclusive com subvenção econômica.

Embora haja uma razoável disponibilidade de recursos humanos e financeiros para EO, até o presente momento essas ações estão concentradas ou no âmbito científico – mais especificamente no campo dos materiais –, com pouco resultado tecnológico mensurável, ou em poucos exemplos de projetos de produtos finais que ainda não alcançaram escala comercial, como a língua eletrônica – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) –, nariz eletrônico – Petrobras e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)/Universidade Católica de Pernambuco (Unicap) –, OPV – CSEM Brasil – e OLED para iluminação (Fundação CERTI-Philips).

Não por menos, apenas 16 pedidos de patentes²² foram realizados na área, e o esforço para formação de recursos humanos especializados acaba sendo dispersado pela ausência de empresas e institutos capazes de reter esses talentos.

Oportunidades de geração de valor local

A relevância dos institutos de tecnologia e do empreendedorismo

Esse resultado tímido é compatível com o estágio de desenvolvimento da EO. Com consideráveis desafios tecnológicos e produtivos nos mais diversos nichos, talvez à exceção da área de *displays* OLED, na qual o mercado

²² Contabilizadas patentes de instituições vinculadas ao Ineo.

já atingiu maturidade razoável, a EO demanda uma atuação ativa do poder público para compartilhamento de riscos e apoio na organização do setor.

O *roadmap* tecnológico será atingido em compasso com o *roadmap* de mercado, o que significa dizer que as aplicações de nicho precisam ser consolidadas para que haja estímulo para avanço nos investimentos em escala para redução de custos e consequente aumento das aplicações e ampliação dos nichos de mercado até que se atinja um mercado de massa. É essa a sequência natural de entrada de uma tecnologia disruptiva, especialmente quando se trata de criar novos mercados. Como frisado anteriormente, esse processo pode demorar cinco, dez ou vinte anos.

Essa incerteza sobre a maturidade da tecnologia, aliada, entre outros fatores, à necessidade de testar e desenvolver diferentes mercados e às baixas barreiras de entrada da EO – especialmente a obtida por meio de impressão –, acaba por tornar o setor mais apropriado para empresas pequenas, mais ágeis e propensas a pensar “fora-da-caixa”.

Esse diagnóstico já foi apontado por Assunção (2011), indicando a necessidade de buscar fortalecer o conhecimento dos institutos de tecnologia em compasso com o incentivo ao empreendedorismo na área.

Oportunidades para o Brasil

À época dos estudos iniciais do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) em 2007, vislumbrava-se como uma aposta a aplicação em *displays* orgânicos (OLED), sensores e células fotovoltaicas [Vaz (2007)]. É possível dizer que, para a primeira das apostas – os *displays* –, é improvável que o país consiga atingir um protagonismo mundial com o paradigma tecnológico e produtivo atual. As empresas asiáticas que dominam a cadeia da tecnologia vigente (LCD) decidiram investir de forma intensa na substituição tecnológica, adquiriram os principais ativos produtivos e de conhecimento para OLED²³ e escalaram a produção para estágios hoje dificilmente alcançáveis para o desenvolvimento de tecnologias centrais para *displays* OLED no país.²⁴

²³ Por exemplo: em 2007, a japonesa Sumitomo adquiriu a britânica CDT por R\$ 285 milhões; a Samsung adquiriu, em 2013, a alemã Novaled por US\$ 350 milhões.













²⁴ Por exemplo: em 2013, a LG anunciou investimentos de US\$ 650 milhões em fábrica de geração 8 de *displays* OLED.




O quadro atual (2014) indica que, no médio prazo, há oportunidades para o desenvolvimento em células fotovoltaicas (OPV) – pelo fato de existir projeto no Brasil na fronteira tecnológica em processo de produção –, em sensores e sistemas inteligentes, pois as cadeias produtivas ainda estão em formação no mundo em todos os seus elos – nos materiais, processos de produção, dispositivos, produtos e, fundamentalmente, nos mercados.

Em iluminação OLED, a presença de grandes *players* de iluminação e os avanços que são compartilhados com a já dinâmica indústria de OLED para *displays* dificultam o desenvolvimento de tecnologias centrais de materiais, produção ou do *bare*-OLED. Há ainda potencial significativo de diferenciação em luminárias e projetos arquitetônicos, além de ser possível atrair investimentos fabris desses *players* para compartilhar o risco de escalar a tecnologia.

Em todos os segmentos, a virtual ausência de uma indústria de química fina brasileira, somada com o fato de que há grandes *players* envolvidos, torna pouco provável que o país tenha protagonismo no desenvolvimento de materiais, sejam pequenas moléculas ou polímeros. Todavia, há de se observar que, no longo prazo, em alguns segmentos, o domínio tecnológico do elo dos materiais torna-se relevante para a manutenção da competitividade – por exemplo, Samsung adquiriu a NovaLed.

Quadro 10 | Oportunidades e desafios para o país

	Materiais	Processos produtivos	Componentes & dispositivos	Aplicações
<i>Displays</i> OLED				
Iluminação OLED				
OPV				
Componentes e Sistemas Inteligentes				

-  Desafio: desenvolvimento de pesquisa e fornecedores locais
-  Oportunidade: atração de investimento produtivo local
-  Oportunidade: atração de investimento produtivo e desenvolvimento locais

Fonte: BNDES.

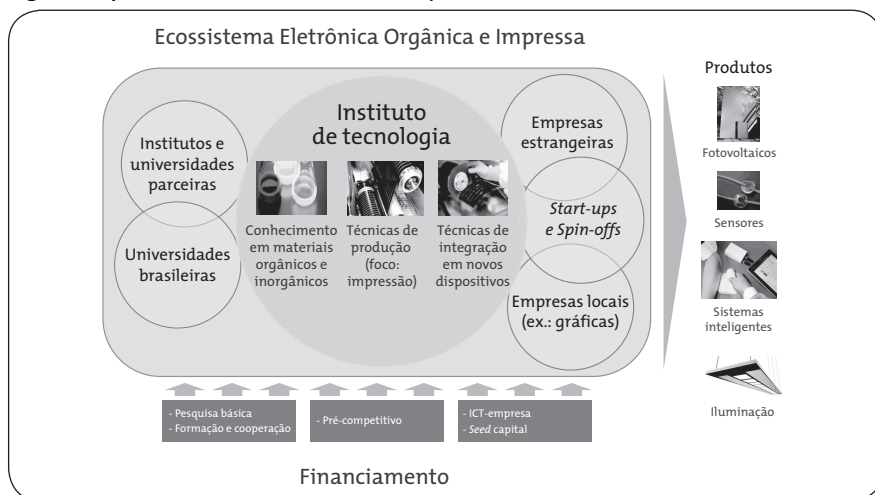
No longo prazo, há um conjunto de competências que serão relevantes caso o Brasil deseje ter protagonismo não só nas áreas de EO, mas também em todos os outros materiais inorgânicos:

- **técnicas de impressão**, como forma de desenvolver uma eletrônica de baixíssimo custo;
- **impressão de transistores**, base para diversos dispositivos eletrônicos;
- **integração de dispositivos híbridos**, sendo relevante para potencializar investimentos que estão sendo feitos na área de eletrônica convencional no país, como o CEITEC e a Unitec Blue (ex-Six), destacando-se os *chips* híbridos.

Proposta de modelo para o Brasil

Partindo das premissas de que: (1) há ainda desafios tecnológicos significativos em EO e EI; (2) as inovações e primeiros negócios dependem de integração ao longo da cadeia de valor e parcerias tecnológicas; (3) o empreendedorismo será chave, pois se trata de desenvolver novas aplicações e novos mercados; (4) há a necessidade de concentrar e manter o aporte de recursos públicos, pois se trata de um desenvolvimento de longo prazo; propõe-se o modelo de desenvolvimento apresentado na Figura 10.

Figura 10 | Modelo de desenvolvimento para EO e EI



Fonte: BNDES. Imagens de © CSEM Suíça, © CSEM Brasil e © CERTI.

A concentração de recursos no instituto de tecnologia está em linha com os diagnósticos que apontam a dispersão e desarticulação de recursos de P&D como um dos principais problemas do sistema de inovação no país e foi um dos principais motivadores da criação da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii).

Tal modelo seria muito importante para complementar a cesta de instrumentos de financiamento para todo o ciclo de amadurecimento tecnológico até a chegada ao mercado. Na base, o financiamento da pesquisa básica em materiais, engenharia etc. deveria ser feito com ênfase em formação e fortalecimento de universidades na área – por exemplo, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). No extremo oposto, o financiamento para estimular parcerias entre institutos de ciência e tecnologia e empresas – por exemplo, Embrapii, BNDES Funtec e Finep ICT-Cooperativo e Plano Inova Empresa – bem como incentivo ao empreendedorismo – por exemplo, Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae), Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) etc. – são essenciais.

Cumprir comentar que, como em qualquer área dependente do surgimento de novas empresas, o ambiente de negócios e a facilidade para abrir e fechar empresas são dificuldades brasileiras estruturais que devem ser consideradas.

Todavia, há uma importante lacuna a ser preenchida no âmbito da pesquisa pré-competitiva, realizada na Europa por instrumentos como os *frameworks* FP7 e Horizon 2020. Recursos destinados à pesquisa tecnológica de longo prazo são essenciais para o amadurecimento da tecnologia.

A inserção internacional por meio de parcerias com institutos tecnológicos e o rápido acesso a insumos e componentes para pesquisa e produção local são partes indispensáveis no desenvolvimento de qualquer plataforma tecnológica hoje no mundo.

Por fim, a formação de pessoal deve ser considerada em contexto multidisciplinar – pois envolve áreas do conhecimento diversas, entre as quais química, materiais, eletrônica e engenharia – e internacional (por exemplo, Ciência Sem Fronteiras), já que essa nova eletrônica está se desenvolvendo fora do Brasil.

Conclusões

O tão falado “bonde da história” não passa apenas uma vez quando se trata do campo das tecnologias de informação e comunicações. A descoberta de novos materiais semicondutores orgânicos (e inorgânicos) abre uma oportunidade de desenvolvimento de longo prazo para o país, especialmente quando se trata de técnicas de impressão que têm o potencial de reduzir significativamente os investimentos produtivos e fazer manufaturas em massa customizadas.

O domínio das técnicas de impressão dos elementos básicos – diodos e transistores – é chave para que o país participe dessa nova eletrônica que se descortina. A evolução da ciência dos materiais, com surgimento de novas moléculas, polímeros e novos sistemas nanoestruturados a cada ano – por exemplo, grafeno, perovskitas etc. –, reforça a importância de desenvolvimento de competência nesse elo da cadeia de valor.

Nos países líderes, os investimentos na plataforma tecnológica de EO estruturam-se em *clusters* cooperativos entre empresas, governo e universidades. No Brasil, há tradição na pesquisa científica na área, mas ainda há muito a fazer no campo da pesquisa tecnológica e no desenvolvimento de produtos e mercados.

O BNDES tem desempenhado um importante papel ao apoiar projetos na área de EO. Contudo, para que o país dê saltos maiores, é importante que sejam desenvolvidos instrumentos de financiamento pré-competitivos. Para além disso, é importante que haja uma política articulada de longo prazo no governo federal – entre Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), CNPq e Finep; Ministério da Fazenda (MF); Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC); BNDES; e Planalto – priorizando o tema e as estratégias para criação de instituto tecnológico de referência, formação de talentos, entre outras ações.

Referências

ASSUNÇÃO, F. *Eletrônica orgânica: contexto e proposta de ação para o Brasil*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, dez. 2011. Série Documentos Técnicos, n. 12.

BARDSLEY, A. *et al. Solid-State Lighting Research and Development*. Multi-Year Program Plan Solid-State Lighting Program. Departamento de

Energia dos EUA, 2014. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2014.

CREMONA, M. *Avaliação do potencial de aplicações possíveis dos semicondutores orgânicos*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2006. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/atividades>>. Acesso em: 13 jun. 2014.

DAS, R.; HARROP, P. *Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities 2013-2023*. IDTechEx, 2013.

DÖRSAM, E. *Printing Technology for Electronics – Introduction*. Technische Universität Darmstadt, 2013. Disponível em: <http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesungen_4/printingtechnologyforelectronics/ss_6/Printing_Technology_for_Electronics_01_Introduction_V2.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2014.

EGELHAAF, H. J. *OPV Stability – From Materials to Modules*. Konarka, 2011. Disponível em: <http://organext.org/userfiles/talks-conference/hans_joachim_egelhaa.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2014.

ELECTRONICS.CA. Global Organic Electronics Market to Reach US\$ 32.8 Billion by 2017. *Semiconductor Research News*, 10 jan. 2012. Disponível em: <<http://www.electronics.ca/presscenter/articles/1624/1/Global-Organic-Electronics-Market-to-Reach-US328-Billion-by-2017/Page1.html>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

ELECTRONICS.CA PUBLICATIONS. *Solar Photovoltaic Technologies and PV Market Trends*. 11 jun. 2014. Disponível em: <<http://www.electronics.ca/solar-photovoltaic-technologies-and-pv-market-trends.html>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

GARTNER. *Innovation Insight: Printed Electronics*. Dez. 2012. Disponível em: <<http://www.gartner.com/document/2286315?ref=lib>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

IDTECHEx. OPV unique selling points and challenges for the next decade. *Printed Electronic World*, 17 abr. 2013. Disponível em <<http://www.printedelectronicworld.com/articles/opv-unique-selling-points-and-challenges-for-the-next-decade-00005355.asp?sessionid=1>>. Acesso em: 11 jul. 2014.

KAWAKITA J. *Trends of research and development of dye-sensitized solar cells*. Sci Technol Trends, 2010.

KIRCHMEYER, S.; HECKER, K. *Organic and Printed Electronics – Applications, Technologies and Suppliers*. 5. ed. OE-A (Organic and Printed Electronics Association), 2014.

KREBS, C. *et al.* Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. *Materials Today*, v. 15, n. 1-2, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702112700196>>. Acesso em: 13 jun. 2014.

LOMBAERS, J. *TNO VP (Vraaggestuurd Programma) Large Area Electronics*. Holst Centre, 2014. Disponível em: <<https://www.tno.nl/downloads/P611.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2014.

MEDEIROS, E. *et al.* *Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Série Documentos Técnicos, 2.

MELNICK, J. Cutting Up the LCD Pie: Calculating the Billion-Dollar Slices from Display Innovation. *Portal LuxResearch*, 14 mar. 2012. Disponível em: <https://portal.luxresearchinc.com/research/report_excerpt/10101>. Acesso em: 13 jun. 2014.

NOBEL PRIZE. *The Nobel Prize in Chemistry, 2000: Conductive polymers*. 2000. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/advanced-chemistryprize2000.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2014.

OE-A – ORGANIC AND PRINTED ELECTRONICS. *Applications, Technologies and Suppliers*. 5. ed. 2013.

OLED-INFO. *OLED vs LED*. [on-line]. Disponível em: <<http://www.oled-info.com/oled-vs-led>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

REESE, C. *et al.* Organic thin film transistors. *Materials Today*, set. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702104003980>>. Acesso em: 13 jun. 2014.

SALLEO, G. Entrevista concedida ao Boletim da SBPMat. Entrevistas com plenaristas do XIII Encontro da SBPMat: Alberto Salleo (Universidade de Stanford, EUA). Disponível em: <<http://sbpmat.org.br/english-interviews-with-plenary-lecturers-of-the-xiii-sbpmat-meeting-alberto-salleo-stanford-university-usa/>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

SI STAFF. *Solar Industry Magazine*, 4 mar. 2008. Disponível em: <http://solarindustrymag.com/e107_plugins/content/content.php?content.1045>. Acesso em: 23 jun. 2014.

_____. *New Solyndra Report Claims Loan-Guarantee Investigations 'Uncovered A Political Saga'*. 3 ago. 2012. Disponível em: <http://www.solarindustrymag.com/e107_plugins/content/content.php?content.10886>. Acesso em: 28 ago. 2014.

US DoE – US DEPARTMENT OF ENERGY. *Solid-State Lighting Research and Development Multi-Year Program Plan*, 2013.

VAZ, A. et al. *Semicondutores Orgânicos: proposta para uma estratégia brasileira*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2007. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br/atividades>>. Acesso em: 13 jun. 2014.

VICENTE, C. *Desenvolvimento de películas de PDMS para o aumento da eficácia luminosa de lâmpadas de OLED*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, mar. 2014.

WOLDEN, C. et al. *Photovoltaic manufacturing: present status, future prospects and research needs*. Brookhaven National Laboratory, Departamento de Energia dos EUA. 2010. Disponível em: <https://www.bnl.gov/pv/files/pdf/233_Wolden_JVST_paper.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2014.

Site consultado

EDISON TECH CENTER – <www.edisontechcenter.org>.